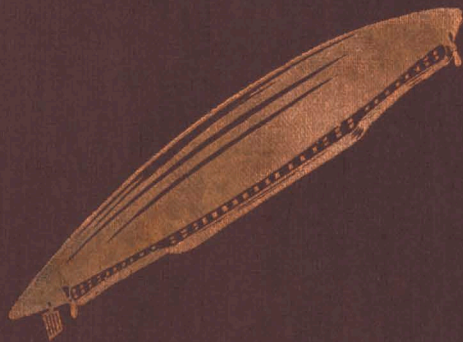


К. Э. ЦИОЛКОВСКИЙ





ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ ИНЖ.-МЕХ. Е. В. ЛАТЫНИНА

С БИОГРАФИЧЕСКИМ ОЧЕРКОМ ПРОФ. Н. Д. МОИСЕЕВА

О Н Т И Н К Т И С С С Р

**★
1984**

ГОСМАШМЕТИЗДАТ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО

КНИГА I

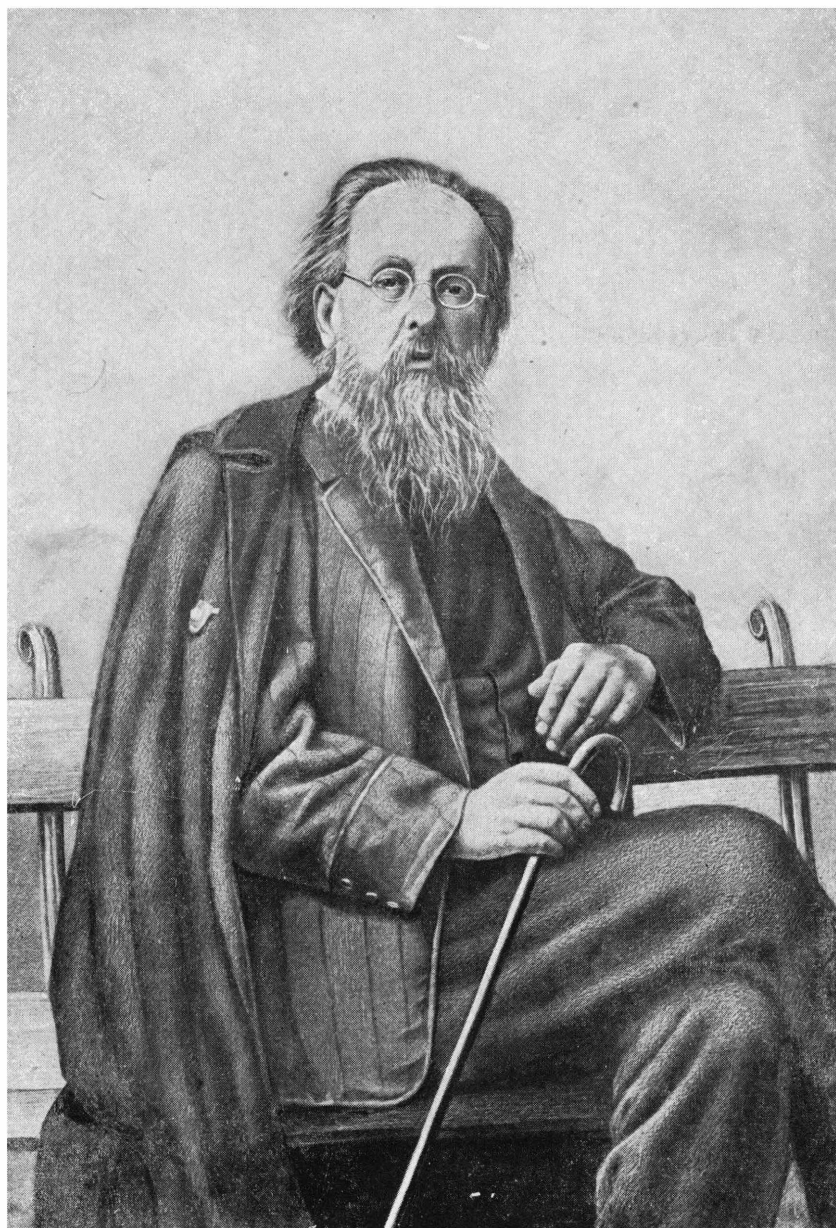
ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ДИРИЖАБЛЬ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ Я. А. РАПОПОРТА

ОНТИ НКТП СССР

**★
1934**

ГОСМАШИНИЗДАТ



От редактора

В 1932 г. в связи с исполнявшимся в сентябре 75-летием К. Э. Циолковского было принято решение издать его избранные труды.

Необходимо было из всего громадного перечня трудов Циолковского отобрать для издания в первую очередь труды, наиболее ценные и актуальные для нашего времени.

Вопросы, над которыми работал и сейчас еще работает Циолковский, многочисленны и разнообразны, понятие о чем дает приводимый нами в этой книге список его печатных трудов и неопубликованных рукописей. Две темы в этом списке являются основными: цельно-металлический дирижабль с оболочкой, меняющей свой объем, и ракета в ее применении для передвижения в межпланетном пространстве — два замечательных изобретения Циолковского, над которыми он работает в течение более 40 лет. И только теперь, при советской власти, после десятков лет безуспешных попыток заинтересовать общественное мнение царской России своими изобретениями, Циолковский наконец является свидетелем и идейным руководителем работ, ведущихся по осуществлению предложенных им проектов.

Комитет по изобретательству при СТО внес предложенный Циолковским цельнометаллический дирижабль в список особо важных изобретений.

При Дирижаблестрое создан Отдел цельнометаллических дирижаблей Циолковского, где ведется проектирование дирижабля, строятся опытные модели, разрабатываются детали конструкции. На основании полученных данных испытания построенной 11-метровой модели имеется уже уверенность не только в осуществимости идеи Циолковского, но, более того, и в осуществимости ее как раз в тех конструктивных схемах, которые были Циолковским даны.

Мы приводим несколько снимков с этой модели, на которой подтвердились предсказания Циолковского о свойствах оболочки и оправдалась предложенная им методика расчета.

Идея реактивного движения, правда, пока еще не в применении к межпланетным путешествиям, в чем Циолковский видел главное назначение своего изобретения, а только на службе современных технических проблем, нашла многочисленных последователей и у нас и за границей.

При ЦС Осоавиахима организован отдел, носящий название ЦГИРД (Центральная группа изучения реактивного движения), имеющий отделения в различных городах Союза. Здесь ведется большая научно-исследовательская работа по созданию реактивного двигателя и изучению возможности его применения для полетов. За границей ряд ученых занят разработкой вопросов ракетного летания, причем были построены опытные ракеты с жидким топливом (т. е. той системы, которую предложил Циолковский), совершавшие пробные полеты. Делаются также попытки установить ракетный двигатель на автомобиле и аэроплане.

Производятся удачные опыты и по применению ракеты для почтовых целей.—область, где почтовая ракета по быстроте доставки почты вряд ли будет иметь конкурентов.

Приведенные факты ставят труды Циолковского по дирижаблю и ракетам бесспорно на первое место среди других его трудов.

Этими соображениями и руководствовалось издательство, намечая содержание первого („Цельнометаллический дирижабль“) и второго („Реактивное движение“) томов настоящего сборника.

Среди большого количества других трудов Циолковского наибольший, но уже преимущественно исторический интерес представляют его работы по аэродинамике — по исследованию сопротивления воздуха (с помощью изобретенной им „воздуходувки“ — прототипа современной аэродинамической трубы) и работа по аэроплану (например работа „Аэроплан или птицеподобная летательная машина“, изд. 1895 г., где Циолковский задолго до первых полетов братьев Райт дает схему аэроплана со свободно несущим крылом, близкую к современным типам, и разрабатывает теорию полета).

Эти работы, как и многие другие по физике и астрономии, а также его произведения, посвященные пропаганде идеи применения дирижабля и ракеты, написанные в духе „научной фантастики“, представляют большой интерес и должны быть в дальнейшем переизданы.

Нет сомнения, что и среди рукописей Циолковского найдется немало интересного и подлежащего опубликованию.

Настоящий том, первый, посвященный дирижаблю Циолковского, выходит под редакцией инж. Рапопорта, технического руководителя группы, работающей над проектированием дирижабля системы Циолковского.

Инж. Е. Латынин

К. Э. Циолковский

(опыт биографической характеристики)

Введение

О Циолковском написано немало книг. Имеется несколько биографий; существуют и различные варианты автобиографии Циолковского. Поэтому возникает вопрос: чем же можно мотивировать появление еще одной биографии? Разве недостаточно подробно и полно освещают наиболее существенные факты жизни и творчества Циолковского уже имеющиеся книги, жизнеописания и переложения его трудов?

На этот вопрос ответить не так-то легко. Правда, много написано о Циолковском. Правда и то, что эти труды неоднократно освещались с самых разнообразных точек зрения видными специалистами. Однако во всей перечисленной литературе чего-то нехватает, нехватает чего-то существенного, важного, потому что самое внимательное изучение литературы о Циолковском не дает читателю *облика* Циолковского — *работника, мыслителя, изобретателя*, не дает разрешения загадки, почему же, несмотря на то, что сейчас, особенно после 75-летнего юбилея, когда его имя известно повсюду, знакомы всякому и его заслуги и изобретения, когда его проекты осуществляются, когда над разработкой предложений Циолковского трудятся десятки организаций, инженеров-практиков и теоретиков и в СССР и за границей, — почему, повторяем, сейчас сам Циолковский остался в стороне? Почему около него нет школы? Почему работающие над осуществлением его проектов и заветных мыслей работают не под его непосредственным руководством, а как-то сами по себе? Почему эти работники не связаны с ним органическими, крепкими узами учителя с учениками?

Биографии Циолковского этого вопроса не разрешают. Не разрешают они и ряда других вопросов, относящихся к характеристике Циолковского как ученого. Действительно, тематика трудов Циолковского имеет весьма широкий диапазон — от технических проектов самолета, дирижабля с металлической оболочкой и ракеты, через кинетическую теорию газов, астрофизику и даже биологию, до попыток создания собственной философской системы. Об этом в литературе о Циолковском подробно

рассказано, но не вычитаешь из этой литературы характеристики Циолковского как инженера, как астронома, как философа. До сих пор в литературе о Циолковском был принят тон восхвалений и славословий. За этими восхвалениями живая личность незаурядного изобретателя и мыслителя-самоучки исчезает, не видно истинного лица автора работ по астрофизике, физике, астрономии и т. п., нет беспристрастной оценки методики работы Циолковского и ее результатов. Так до сих пор остался нерешенным вопрос: ученый ли Циолковский? Дал ли он что-нибудь ценное для областей человеческого знания, выходящее за пределы технических проектов, и не является ли он только изобретателем?

Предлагаемая вниманию читателя характеристика Циолковского как работника мысли, разумеется, не претендует на полное разрешение всех указанных выше неясностей. Нашей целью было лишь дать попытку более объективного исторического анализа кинематики и динамики дел и дум Циолковского. Наша характеристика неполна и в некоторых частях несовершенна. Извинением всего этого служит только то, что она нужна: проблема творческой личности Циолковского, будь она решена, принесла бы много поучительного.

В заключение этого краткого введения следует указать, что в тех местах, относительно которых можно найти более подробные пояснения в одной из книг, посвященных изложению результатов работ Циолковского, мы, разумеется, будем ограничиваться ссылками на соответствующую литературу. Особенно это относится к работам, связанным с металлическим дирижаблем и ракетой, — в этой части литература о Циолковском по нашему мнению достаточно полна.

Детство. Юность. Самообразование. Механические игрушки

Константин Эдуардович Циолковский родился 5 сентября старого стиля 1857 г. в селе Ижевском, Спасского уезда, Рязанской губернии. Отец его, поляк по происхождению, был лесничим на казенной службе.

По воспоминаниям самого Циолковского отец его имел тяжелый характер, вид имел мрачный, был спорщиком и протестантом по натуре. Придерживался почти исключительно общества поляков и был польским патриотом; дух семьи был в связи с этим оппозиционный по отношению к царскому правительству. В детях своих поощрял влечение к физическому труду и к самостоятельности. Иногда мастерил с ними разные мелочи. Пробовал даже принять участие в обучении детей, но из этого ничего не выходило — был слишком нетерпелив и несистематичен.

Первоначальное образование детей сосредоточивалось в руках матери: она обучала детей и грамоте, и начаткам арифметики. По воспоминаниям самого Циолковского мать его была в противоположность отцу веселой, подвижной, сангвиничной, была музыкальна и недурно пела.

Детей в семье было много — 13 человек. По имеющимся сведениям никто из них ничем особенным не выделялся. В настоящее время все они уже умерли. Константин Эдуардович был последним ребенком, наиболее слабым физически и даже, как он сам указывает, более слабым в отношении одаренности.

Имея большую семью, меняя часто службу из-за своей неуживчивости, часто переезжая с места на место, отец Циолковского не мог полностью обеспечить свою семью. Денег было в обрез. Терпели лишения, временами нуждались в самом необходимом. Разумеется, все это накладывало отпечаток и на детей и отражалось на их воспитании и образовании. Насколько можно судить из данных автобиографии Циолковского, не все дети получили даже первоначальное образование в школе, — по отношению к некоторым из них родители были вынуждены ограничиться домашним обучением, которым, как уже сказано было, ведала мать.

Константин тоже в школе не учился. Лет до десяти вместе с другими братьями он учился у матери. Учился средне. Больше увлекался устройством шалашей, воздушных змеев, плаванием в корыте вместо лодки и т. п.

В возрасте около десяти лет случилось событие, наложившее особый отпечаток на весь дальнейший жизненный путь Циолковского: он заболел скарлатиной и после нее оглох. Вследствие этого продолжать учиться вместе с братьями уже стало невозможным, и Константин перестает учиться. Считавшийся и до этого менее способным, чем его братья, он и в мнении семьи, и в собственном мнении переходит в разряд туповатых мальчиков. Описываемое отношение к Константину было настолько резко выражено, что он сам в своей автобиографии называет период времени от начала глухоты до 14-летнего возраста периодом бессознательности. В этот же период умерла мать. Ребенок рос без матери больной, дичащийся, замыкающийся в себя, с затаенной обидой на весь мир, обидой калеки и изгоя.

К концу этого периода „бессознательности“ начали понемногу оформляться и личные наклонности мальчика. Отрезанный от мира, звучащего шумной коллективной радостью, запертый внутри самого себя, он занимается свои досуги играми и забавами, все более и более принимающими вид технической самостоятельности, как сказали бы мы в наше время. Он мастерит различные движущиеся игрушки, делает токарный станок, работает на нем и т. д.

В возрасте 14—15 лет Константин понемногу начинает тяготеть и к книгам. Пробует читать самостоятельно арифметику — понравилось, показалось понятным и ясным. Пробует читать физику Гано, читает какой-то учебник по геометрии. Так, с самостоятельного чтения случайно попавших в руки учебников начинается для Циолковского прохождение курса средней школы.

Насколько известно, нет никаких сведений о том, что мальчику в этот период кто-нибудь помогал разъяснениями или

хотя бы только указаниями, что нужно читать и в какой последовательности, — ребенок был в полном смысле слова предоставлен самому себе.

Однако в бессистемном самообразовании мальчика есть своя собственная система. Он ищет руководства, помощи в осуществлении своих технических затей. Абстракция, не оформленная в конкретный облик, не удовлетворяет его. Он — материалист, эмпирик по своей природе. Он, может быть, и понимает отвлеченное положение, вычитанное из книжки, но понять формально для него мало. Он хочет поверить в это, в понятное. А чтобы поверить в теорию, наш эмпирик имеет только один путь: он должен оформить полученное сведение, построив соответствующие приборы и проведя с ними опыты. Он в эту первобытную эпоху зарождения своего творческого миропознания является „неверным Фомой“: и хочет поверить, но может сделать это, лишь ощупавши пальцами реальное оформление чудесного теоретического факта.

Этим, глубоко идущим внутрь творческой психологии Циолковского, мотивом была обусловлена своеобразная, самодельная система самообразования мальчика. Читая геометрию, он мастерит астролябию и производит с ней ряд измерений. Сам он об этом событии говорит так: „С помощью самодельной астролябии, не выходя из дома, я определяю расстояние до пожарной каланчи, — нахожу — 400 аршин. Иду и проверяю. Оказывается — верно. Так я поверил теоретическому знанию“.

Читая физику — толстую, содержательную, переполненную картинками и описаниями приборов книгу Гано, мальчик делает самостоятельно автомобиль,двигающийся силой реакции струи пара, отбрасываемой назад, аэростат с водородом и ряд других приборов. Узнав из того же учебника Гано о монгольфьерах мальчик впервые приходит к мысли о возможности и целесообразности устройства аэростата с металлической оболочкой и подогреваемым водородом.

Мы видим, насколько органически непрерывно шло, несмотря на все внешние помехи (были ли они, впрочем, помехами?), как глухота, отсутствие учителей и пр., развитие Циолковского. Вся судьба его до 16 лет сплела уже начало прочных определяющих дальнейшее развитие нитей — тип будущего мыслителя, психология его творчества к 16 годам уже зачата. И чем дальше следим мы за Циолковским, тем яснее становится гармоничность развития его упрямой воли и мысли.

Вернемся, однако, к конкретным фактам его внешней жизни. Приборчики, механические игрушки, которые мастерил с большим успехом мальчик, производили большое впечатление на его родственников. Отец поощрял эти увлечения сына. Было видно, что мальчик действительно имеет выдающиеся технические способности. Было решено послать Константина в Москву учиться.

Так и сделали. Поехал Циолковский в Москву. Было это в 1873 г.

Жизнь в Москве. Первые технические мечты

Сведения о жизни Циолковского в Москве очень бедны. Мы ограничимся изложением наиболее ценных для нашей биографической характеристики.

Из дома присылали по 15 рублей в месяц. Циолковский жил впроголодь, ходил в рваной одежде; учиться так и не поступил никуда — продолжал свое самообразование, читал книги в библиотеках (чаще всего как будто в Чертковской публичной библиотеке). Огностительно своего чтения Циолковский в автобиографии говорит следующее: „... Я проходил первый год тщательно и систематически курс начальной математики и физики. На второй год занялся высшей математикой. Прочел курсы высшей алгебры, дифференциального и интегрального исчисления, аналитическую геометрию, сферическую тригонометрию и пр.“

Помогал ли кто-нибудь глухому, полуничему юноше овладевать перечисленными премудростями, были ли у него, если не учителя, то хотя бы советчики, или сотоварищи — совершенно неизвестно. Скорее всего их не было. Но тогда делается непонятным, откуда взялась у самоучки, не учившегося и в начальной школе, такая стройная программа чтения?

Но самое главное в методе подхода Циолковского к познанию мира осталось то же: всюду проверять теоретическое заключение опытом, ставить эксперимент, строить модель, ощупывать теорию, претворять ее в нечто доступное осязанию. Но, оставшись живой и действенной, эта манера усложнялась и разветвлялась дальше. В период московской жизни начала вырисовываться уже усложненная методика подхода к миру: Циолковский ставит себе в этот период ряд проблем, новых, не вычитанных, может быть, а придуманных и только навеянных чтением. Все эти проблемы таковы, что они *требуют* какого-то механического оформления, решения. По смыслу они почти все относятся к области *техники движения*. Это — мысли о том, нельзя ли воспользоваться теми или иными силами, свойствами вещества для осуществления такого-то вот двигающегося аппарата...

Мы бы назвали эту фазу развития мысли Циолковского фазой этюдного технического проектирования, — вернее, фазой изучения основ физики и механики при помощи метода этюдов еще учебного характера, но этюдов, имеющих уже резко выраженную техническую целеустремленность.

К этому периоду относятся, например, такие мысли и проекты Циолковского: нельзя ли устроить поезд вокруг экватора, в котором не было бы тяжести вследствие наличия большой центробежной силы? Нельзя ли строить металлические аэростаты, не пропускающие газа и вечно носящиеся в воздухе? и т. д.

К концу московской жизни можно считать Циолковского уже оформившимся *изобретателем*. Первые попытки изобретать, окончившиеся неудачами, не охладили его пыла, и в основном его жизненный замысел сделался ясным ему самому.

Научные интересы Циолковского лучше всего характеризуются следующим отрывком из его автобиографии:

„Что я читал в Москве? Чем я увлекался?.. Прежде всего — *точными науками* (курсив мой. — Н. М.). Всякой неопределенности и „философии“ я избегал. На этом основании и сейчас я не признаю ни Эйнштейна, ни Лобачевского. Прав ли я, не знаю. Под точной наукой или под истинной наукой я подразумеваю единую науку о веществе или о вселенной. Даже математику я причисляю сюда же...“

Более подробный анализ этого высказывания Циолковского вместе с развернутой характеристикой его научного и философского мировоззрения мы дадим ниже. Здесь же нас интересует главным образом то обстоятельство, что уже в период московской жизни стало совершенно ясным, что основой всех наук в мнении Циолковского является механика — механика, рассматриваемая как наука о перемещениях частиц вещества под действием совершенно определенных сил, тяготения в первую очередь.

Это пристрастное отношение к механике, разумеется, было вполне естественно для Циолковского, если принять во внимание те его особенности, о которых шла речь выше. Однако не следует также забывать и о том, что на выработку подобного отношения к естественным наукам, несомненно, должен был оказать свое решающее влияние и дух времени. Не забудем, что это было в семидесятых годах. Властителями дум молодежи были в то время представители самых крайних форм механистического материализма. Это было время Базаровых, крайних нигилистов и ультратрезвых, сверхпрактически мыслящих вольнодумцев. Это была пора, когда сверху над русским обществом нависали все более и более сгущающиеся тучи реакции, а самое общество было не в силах — в массе — найти правильного выхода, расслаивалось, дробилось и дифференцировалось. Более активная часть шла в революцию, в народ, наиболее пассивная шла в чиновники. Большинство же зачитывалось смесью Писарева и Бюхнера, Молешотта и Тургенева, Толстого и всевозможных изданий Павленкова. В основном же получалось, что передовики из этой средней наиболее многочисленной части молодежи задавали тон нигилистический. Во всяком случае, нигилизм, механистический материализм считались тогда в мнении читающего русского общества за передовые методы, первый — внешнего отношения к жизни, второй — философского ее осмысливания.

Этих влияний, этого увлечения, хотя бы и незаметно для самого себя, разумеется, не мог избежать и Циолковский. И он читал Писарева, увлекался героями „Отцов и детей“ Тургенева, читал и Толстого, был знаком и с толстовцами и с некоторыми свободомыслящими студентами университета. Разумеется, его не миновала и та популярная литература по физике, астрономии и биологии, которая в семидесятых годах в массе была пропитана все тем же духом механистического, наивного мате-

риализма. Одним словом, в этом отношении Циолковский был в полной мере сыном своего времени. Социальное же его положение „разночинца“, материальные условия существования — полуголодного, одетого в рваную одежду, живущего в углу у прачки, — все это само по себе отжимало Циолковского в ряд деклассированной богемы. И мы хотели бы здесь подчеркнуть, что нет ничего удивительного в том, что и на молодого Циолковского оказало влияние модное в те времена мировоззрение.

От полного увлечения потоком общественной жизни юношу, впрочем, удерживала не только одна глухота. У Циолковского, как уже сказано было выше, в Москве создались совершенно определенные представления о своем истинном призвании. Появились и прочно засели в голове „обворожительные мечты“ об изобретении самых заманчивых аппаратов и приборов. И эти обворожительные мечты заслоняли для юного изобретателя-самоучки и картины развития революционного движения, и общественную жизнь, и всякую иную науку, и „философию“, кроме тех, которые могли непосредственно сейчас, тут же помочь разрешить или осветить задачу устройства того или иного аппарата для перелета, для передвижения по земле или в межпланетном пространстве.

Были, разумеется, и другие мечты. Промелькнула чудная первая влюбленность в девушку, которую Циолковский так и не увидел ни разу, дочь одного богача. Прачка, квартирная хозяйка Циолковского, рассказала в доме этого богача о своем чудном квартиранте. Возникла переписка... В одном из писем, между прочим, наш мечтатель уверял свой предмет, что „он такой великий человек, которого еще не было, да и не будет...“

Кончилось обыкновенно: родители девушки попросту запретили переписку.

Приведенная нами выдержка из письма Циолковского, разумеется, сама по себе ничего интересного не представляет. Действительно, редкий из нас миновал в возрасте от 15 до 20 лет это увлечение верой в себя, в свое избранничество, в свою исключительность. Думается, что как бы скромен человек ни был в период оформления его духа и воли, в период первых схваток с упорным и косным миром, в период „бури и натиска“ молодого борца, особенно в дореволюционное время, когда личная инициатива и воля к борьбе одиночки только и могла дать возможность выжить индивидуальности, хоть скольконибудь выделяющейся над общим уровнем, в суровой обстановке борьбы за существование, совершенно естественной следует признать эту вспышку самоутверждения. Естественно также и то, что эта вспышка имела место в письме к любимой девушке.

Нас интересует здесь другое. Как читатель увидит из следующего, Циолковский так и остался одиноким на всю свою жизнь. До самой революции, принесшей ему окончательное признание и поддержку общества, жизнь Циолковского была

жизнью одиночки. И вот в этом одиноком Я, неумело сносящимся с внешним миром, порой признаваемом, значительно чаще непризнаваемом дореволюционным русским общественным мнением, — в этом одиноком Я странно гармонически развивается и крепнет то исключительное „единство противоположностей“, которым особенно замечателен внутренний духовный облик Циолковского. По натуре своей это — человек исключительно скромный и даже застенчивый и одновременно он же, тот же самый Циолковский, органически ощущает себя великим, почти пророком... Этот скромный человек, как в дальнейшем окажется, одновременно является иногда и попросту нетерпимым. Скромность, проросшая своими разветвлениями в гордость, — вот кратко наиболее правдивая характеристика Циолковского. В московский период его жизни была зачата эта внутренняя противоречивость характера. В дальнейшей жизни эта противоречивость только росла, но росла гармонически, не причиняя страданий самому Циолковскому.

Однако мечты мечтами, а три года полуголодного существования пролетели. В 1876 г. отец вызывает к себе письмом Циолковского, и он возвращается в отчий дом. Юноше было уже 19 лет. Период первоначального оформления его духа, период первоначального знакомства с миром фактов и теорий был окончен. Начался период перехода от мечты к ее овеществлению, период поисков способов реализовать приобретенные знания для оформления новых изобретений и устранения препятствий, которые мешали осуществить юношеские мечты о металлическом дирижабле и межпланетном корабле.

Возвращение в семью. Учительство. Начало самостоятельной жизни. Женитьба.

По возвращении домой, после того как прошел первый период отдыха и восстановления сил, отец Циолковского подыскал среди своих знакомых для Константина частные уроки по элементарной математике и физике. Молодой репетитор очень скоро прославился способностью понятно и просто объяснять. Клиентура его быстро росла. Уроки давали заработок, хотя и небольшой (от четвертака до рубля за час). Появившиеся собственные средства Циолковский мог с большей свободой тратить на свои механические увлечения. Обзавелся мастерской, купил инструменты. Делал разные приборы; сделал водяные лыжи и т. д. Много читал; книги брал из библиотеки. К этому времени относится его знакомство с „Математическими принципами натуральной философии“ Ньютона и с курсами теоретической механики.

В 1878 г., когда Циолковскому минуло 21 год, его отец вышел в отставку и переехал вместе с семьей в Рязань. К этому же времени относится призыв Циолковского к воинской повинности. Ввиду глухоты и развившейся к тому времени близорукости от воинской службы он был освобожден,

В Рязани, на новом месте, Циолковский не мог сразу получить уроков. Небольшая пенсия отца и скромные сбережения от прежних уроков Циолковского явно не давали хотя бы сколько-нибудь обеспеченного существования. Начались поиски работы. Возникла мысль сдать экзамен на учителя. В 1879 г. в Рязани Циолковский сдал этот экзамен, получил звание учителя народных училищ, подал заявление о предоставлении места и стал ждать.

Отец был очень обрадован этим первым официальным успехам своего сына. Наскребли денег рублей тридцать и сшили для будущего учителя мундир и пальто.

В промежутки от экзамена до получения места, около четырех месяцев, Циолковский жил у одного местного помещика на положении репетитора его детей. Свободное же время заполнял мечтами о своих летательных аппаратах и занятиями по вопросам механики, связанными с тяжестью, центробежной силой и т. п. К этому времени, возможно, следует отнести зарождение некоторых мыслей относительно использования центробежной силы для разрешения частных вопросов из области теории межпланетных перелетов, которые Циолковский потом так настойчиво развивал. От этого периода сохранились некоторые чертежи и расчеты.

Зимой 1880 г. Циолковский получил назначение на должность учителя арифметики и геометрии в Боровское уездное училище и переехал в Боровск Калужской губернии.

Там же, в Боровске, в 1881 г. Циолковский женился на дочери своего квартирного хозяина. При женитьбе Циолковский хотел найти в жене подругу для своей трудовой и скромной жизни, товарища ровного и спокойного, помощницу... Прошло около 50 лет совместной жизни Циолковского с его женой. И теперь в своей автобиографии сам Циолковский пишет, что эти его надежды полностью оправдались.

Период жизни в Боровске событиями очень небогат. Ровная, однообразная работа в училище. Сдержанные отношения с преподавательским составом; враждебные отношения с некоторыми из них, не взлюбившими Циолковского за его непритязательность и честность, за обособление от их общества, за хорошие отношения с учениками.

Педагогические таланты Циолковского помогали ему побороть трудности, связанные с глухотой. Кроме того в части, касающейся опытов, наглядных моделей, как легко представляет себе читатель дело обстояло прекрасно.

Затрачивая значительную часть своего скромного заработка, много труда и времени, Циолковский основательно пополнил физический кабинет училища. Его демонстрации и опыты приобрели ему широкую популярность в городе. У него, как он сам говорит, „сверкали электрические молнии, гремели громы, звонили колокольчики, плясали бумажные куколки, пробивались молнией дыры, загорались огни, вертелись колеса, блистали иллюминации и светились вензеля. Толпа одновременно и пора-

жалась громовым ударам, и любовалась, и дивилась электрическим осминогом, который хватал всякого своими ногами за нос или за пальцы". Ученики увлекались сухим до сего времени для них предметом.

Немного приходилось подрабатывать частными уроками, так как жалованья не хватало. Но и здесь Циолковский выделялся своей неприязнательностью на общем фоне процветавшего среди остальных преподавателей рвачества и погони за хорошо оплачиваемыми уроками. Как говорит сам Циолковский, „педагогический персонал был далеко не идеальный...“.

Отношения с начальством были не вполне гладкими: своеобразие поведения глухого учителя, его увлечение опытами, высказываемые им вольнодумные соображения, — все это возбуждало некоторую подозрительность начальства, а иногда и прямые репрессии.

Приведем для примера один факт, о котором Циолковский рассказывает следующими словами:

„Я очень увлекался натуральной философией. Доказывал товарищам, что Христос был только добрый и умный человек, иначе он не говорил бы такие вещи: „понимающий меня может сделать то же, что я, и даже больше“. Главное — не его заклинания, лечение и „чудеса“, а его философия. Донесли в Калугу директору. Директор вызывает к себе для объяснений. Занял деньги, поехал. Начальник оказался на даче. Отправился на дачу. Вышел добродушный старичок и попросил меня подождать, пока он выкупается.

— Возница не хочет ждать — сказал я. Омрачился директор, и между нами произошел такой диалог:

— Вы меня вызываете, а средств на поездку у меня нет...

— Куда же вы деваете свое жалованье?

— Я большую часть его трачу на физические и химические приборы, покупаю книги, делаю опыты...

— Ничего этого вам не нужно... Правда ли, что вы при свидетелях говорили про Христа то-то и то-то?

— Правда, но, ведь, это есть в евангелии Ивана.

— Вздор, такого текста нет и быть не может. Имеете ли вы состояние?

— Ничего не имею.

— Как же вы — нищий, решаетесь говорить такие вещи?

Я должен был обещать не повторять моих „ошибок“ и только благодаря этому остался на месте, чтобы работать. Выхода по моему незнанию жизни никакого другого не было. Это незнание прошло через всю мою жизнь и заставляло меня делать не то, что я хотел, много терпеть и унижаться.

Труды в течение периода жизни в Боровске

В течение периода учительства в Боровском училище, обнимающем время с 1881 по 1892 гг. и, следовательно, годы жизни Циолковского с 24 по 35-й, труды нашего самоучки начинают

принимать уже форму самостоятельных исследований. Разумеется он продолжал пополнять свои знания путем чтения различных книг, но роль этого чтения уже перестала быть руководящей. Если раньше думы и догадки Циолковского следовали за книгами, то теперь, наоборот, скорее читается лишь та литература, которая соприкасается с интересующим его в данное время вопросом.

Такое положение вещей в возрасте возмужания и для всякого работника науки следует признать вполне естественным. Однако для Циолковского этот переход на самостоятельную работу следует подвергнуть несколько более подробному анализу. Дело в том что Циолковский был и остался на всю жизнь самоучкой. Те руководства, которые он проштудировал в Москве и Рязани, были только учебниками и учебниками элементарными. Из них не было выхода в специальную журнальную литературу и литературу монографическую. Таким образом, получив основные познания по анализу, научившись дифференцировать и интегрировать, разбираться в основных законах механики и физики по учебникам, Циолковский сразу перешел к самостоятельной исследовательской работе. Разумеется, для его системы самообразования, которую мы наметили в общих чертах выше, это было вполне естественным и гармонически совершившимся переходом. Ведь и в самом начале он учился, все время проверяя себя на этюдах, опытах и попытках что-то создать осязаемое самому. Однако здесь-то и сказалась вся слабость этой системы самостоятельной работы, столь заманчивой, если смотреть на нее поверхностно.

Одиноким и не общающимся ни с кем самоучка, подкованный только сведениями из элементарных учебников среднего качества, не мог ни откуда получить умения включиться в общую струю научно-исследовательской работы. Никак не могли научить его элементарные учебники различать актуальную с точки зрения современной ему науки тему от устарелой, никак не могли они его научить и тому, где читать, что читать из журнальной литературы по данному вопросу. И он, этот самоучка, был обречен на „открытие Америк“ во всех своих попытках, которые соприкасались с *разрабатываемыми* наукой вопросами. Это — в лучшем случае, когда получались им правильные результаты. При отсутствии же навыков и специфических приемов научно-исследовательской работы, навыков, которые из книг не вычитаешь, работа самоучки могла и попросту быть бесплодной.

Итак, повторяем, в Боровске Циолковский занимается рядом вопросов из области теоретической физики, астрономии и механики. Занимается как научными проблемами, которые он ставит самостоятельно. Разработка этих вопросов производится при помощи элементарных средств анализа. Основные же все предпосылки твердо выдержаны в духе простой, ясной и любимой с московской поры механистической концепции. Дадим однако слово Циолковскому.

„В то же время я разработал совершенно самостоятельно теорию газов. У меня был университетский курс физики Петрушевского, но там были намеки на кинетическую теорию газов, и вся она рекомендовалась, как гипотеза сомнительная... Ломал голову над источниками солнечной энергии и пришел самостоятельно к выводам Гельмгольца...“.

В тот же период времени им была написана работа о *механике животного организма*.

Не правда ли, очень показательно. Не зная ничего о работах Максвелла, Клаузиуса и Больцманна по кинетической теории газов, к середине восьмидесятых годов уже принципиально закончивших великолепную и сложную постройку кинетической теории вещества, Циолковский самостоятельно доходит до некоторых из основных элементарных соотношений этой теории. Не зная ничего о весьма старых и тогда уже поставленных под сомнение работах Гельмгольца, объяснявших происхождение солнечной энергии сжатием солнца (контракционная теория), Циолковский самостоятельно приходит к этой мысли.

Какова ценность этих фактов с точки зрения научной? По нашему мнению она ничтожна. Не более, не менее как запоздалое лет на двадцать-тридцать открытие Америки, да и то не всей Америки, а только ее более доступной части. Например в кинетической теории газов, из которой Циолковским были самостоятельно получены некоторые элементарные формулы, вся принципиальная часть построена на соображениях теоретико-вероятностных и на теории структуры фазового пространства. Только таким образом оказалось возможным превратить эту часть физики в отрасль науки, хоть сколько-нибудь выдерживающую критику. Что же касается соображений Циолковского, то, будучи лишены этой подпорки, разработанной до него, но оставшейся для него совершенно неизвестной, они никакой критики выдержать не могут и как в его первоначальной рукописи, так и после остаются только первоначальными прикидками типа ученических этюдов, лишенных серьезного научного значения. Что касается работы о продолжительности сияния солнца, то к ней, во-первых, применимо все сказанное о предыдущей работе, а во-вторых, следует заметить, что уже во времена Циолковского теория Гельмгольца была оставлена астрономами, как несоответствующая данным наблюдений.

Следовательно, и здесь та же картина: ученический этюд, лишенный научного значения.

Субъективное же значение этих работ следует признать очень большим. На них одинокий самоучка проверял свои силы, пробовал крылья — выйдет или не выйдет? силен я достаточно или нет? Оказалось — выходит... Рукописи Циолковского: „Теория газов“, „Механика животного организма“, „Продолжительность лучеиспускания звезд“ были им представлены в русское физико-химическое общество. Рецензенты отнеслись к работам весьма сочувственно. Особенно хороший отзыв сделал проф. Сеченов о второй работе. Было отмечено, что автор, несомненно,

обладает выдающимися способностями, и от него можно ожидать ценных работ. Циолковский тогда же был выбран членом общества, но по незнанию устава не отозвался, членского взноса не внес и, таким образом, не сделался и членом.

Здесь, пожалуй, будет уместно остановиться на одном весьма интересном для характеристики Циолковского вопросе. Действительно, он до этой посылки статей в физико-химическое общество был совершенно одиноким. Не на „скромных же вакханалиях“ (по образному его выражению) сослуживцев было искать нашему самоучке единомышленников и собеседников. В среде выпивающих, сплетничающих, состояющих между собой в погоне за наиболее хорошо оплачиваемыми уроками преподавателей училища не было лиц, которые могли бы представить для Циолковского интерес. Но вот он делается членом физико-химического общества... Ведь это же значит, что он, имея штамп, так сказать, официально признанного ученого — штамп, чрезвычайно важный в царской России, может завязать научные отношения, переписку, обмен мнениями с крупнейшими столичными учеными. Выход из душной, гнетущей обстановки мещанства есть, брешь пробита...

И вот Циолковский не пользуется этой брешью. Он отмечает свое признание „столичными учеными“, гордится этим, воспринимает этот факт как свою победу. Но завести с этими столичными учеными переписку, войти с ними в контакт, принять участие в их общей работе на правах равного сочлена, подучиться около них, воспринять их опыт — мыслей об этом у него не возникало. И ни в одной книге Циолковский не жалеет об упущенной им возможности сделаться членом великой семьи ученых. Виноваты в этом не только неопытность и застенчивость Циолковского, но и то, что он был чужд всякой мысли работать в общей семье на правах равного сочлена. Он по самой своей сущности — одиночка, индивидуалист, он не хочет ничьих советов, в них не нуждается.

Так мы нащупываем еще одну важную черту в облике Циолковского как мыслителя: он не только самоучка, но и одиночка принципиальный, — он хочет быть один, и никаких товарищей по работе, а впоследствии окажется, что и учеников ему не нужно.¹

Как уже было сказано, идея постройки металлического управляемого аэростата возникла у Циолковского еще в Москве. В Боровске в 1885 г. в возрасте 28 лет Циолковский снова возвращается к этой мысли и твердо решает заняться теоретической разработкой возможности постройки такого воздушного корабля. Интенсивная работа над этим проектом занимает два года. В 1887 г. весной Циолковский едет в Москву и там в обществе любителей естествознания при Политехническом музее делает свое первое публичное сообщение о металлическом управляемом воздушном корабле. Сообщение встречается сочувственно. Проф. Столетов передает рукопись Циолковского

¹ См. прим. ред. на стр. 35.

на рассмотрение и отзыв проф. Жуковскому. Рукопись озаглавлена „Теория аэростата“. Поездка эта в Москву была предпринята по инициативе инж. Голубицкого, который заинтересовался Циолковским и посетил его в Боровске. Знакомство со Столетовым, оказавшим Циолковскому большую моральную поддержку, также было делом Голубицкого.

Так началась разработка теории цельнометаллического дирижабля, в подробную историю которой мы здесь вдаваться не будем. Интересующийся этой историей читатель может обратиться к книге Я. Перельмана — „Циолковский, его жизнь и изобретения“, ГТТИ, 1932, а также к статье инж. Рапопорта, помещенной в настоящем томе.

К 1889 г. относятся следующие события: неудавшаяся попытка получить перевод в одно из московских училищ и пожар, уничтоживший все имущество Циолковского, рукописи и мастерскую. После потрясения, вызванного этим ударом судьбы, Циолковский находит в себе достаточно силы воли и настойчивости для возобновления и продолжения своих исследований по теории дирижабля. В 1890 г. через посредство Д. И. Менделеева он посылает в Русское техническое общество рукопись „О возможности построения металлического аэростата“ и складывающуюся модель металлической оболочки длиной в аршин.

„Вскоре из газет — пишет Циолковский — я узнал, что общество нашло мои выкладки и идеи вполне правильными. Затем мне выслали и копию с мнения 7-го отдела технического общества. Разумеется, этот отзыв влиял в меня некоторое количество бодрости...“.

После этого Циолковский занимается рядом теоретических расчетов и опытов, касающихся вопроса о сопротивлении, оказываемом воздухом движущимся телам. Результатом этих первоначальных занятий, которые впоследствии были успешно продолжены, была статья „Давление жидкости на равномерно движущуюся в ней плоскость“, напечатанная в т. IV „Трудов отделения физических наук Общества любителей естествознания“ за 1891 г. Статья эта была первой данью, отданной Циолковским идее аэроплана. Результаты исследований несколько разочаровали автора. Аэроплан ему показался малопрактичным по сравнению с дирижаблем.

„Вследствие этого меня, — пишет Циолковский, — опять стало клонить к аэростату. Помню, очень напряженные занятия привели меня к новому труду, называвшемуся „Аэростат металлический, управляемый“. Один из моих братьев и мои знакомые помогли мне издать его в 1892 г. (в Москве, изд. Черткова). Кажется, никогда я не испытывал такого блаженства, как при получении корректур этого труда...“

Так завершился период жизни Циолковского в Боровске. Помимо первых попыток выступления на чисто научном поприще, этот период чрезвычайно интересен как начало серьезной работы над теорией металлического мешка, изменяющего форму и непроницаемого для газа, т. е. теорией металлического



Дом в Калуге на ул. Циолковского (бывш. ул. Брута), в котором Циолковский жил с 1892 г. по 1933 г. В 1933 г. Циолковский переехал в новый дом, подаренный ему Моссоветом

аэростата, и равным образом над теорией аэроплана. С последней связаны работы по изучению сопротивления воздуха. Все эти начинания, идущие, как видит читатель, от технического замысла, через предварительный расчет к окончательному проекту летательного прибора, были поставлены Циолковским в Боровске, как основные проекты, основные темы дальнейшей работы.

Следующий период, к описанию которого мы переходим, был периодом окончательного оформления названных исследований и зарождения еще одного проекта — реактивного межпланетного корабля.

Переезд в Калугу. Учительство. Продолжение работ по воздухоплаванию. Начало работы над проектом межпланетного корабля

В 1892 г., когда Циолковскому исполнилось 35 лет, он получил перевод в Калугу учителем в уездное училище. Внешне это мало изменило его жизнь. Среда, окружавшая Циолковского в Калуге, мало чем отличалась от учителей и мещан Боровска. Работа в училище попрежнему шла благополучно. Ученики любили своего учителя. Он растолковывал им физику, показывал опыты...

Около этого времени умер отец Циолковского в возрасте 61 года и Циолковский окончательно оторвался от семьи. По-прежнему увлекался устройством разных игрушек, лодок и пр. Дома мастерил модели для своего аэростата и занимался опытами над сопротивлением воды и воздуха движению. Об этих-то работах мы и поговорим сейчас более подробно.

Начаты они были еще в Боровске. К мысли об исследовании явления сопротивления жидкостей и газов движению в них тел различной формы Циолковский пришел, как нам известно, совершенно самостоятельно. Дело в том что вся предварительная полемика относительно достоинств и недостатков управляемого аэростата вращалась около одного-двух вопросов, одним из них, пожалуй, наиболее острым был такой: может ли аэростат развить скорость, достаточную для того, чтобы „не быть обреченным на все время остаться игрушкой ветров“?

Этот вопрос для Циолковского совершенно определенно и правильно связывался с вопросом о том, насколько будет велико сопротивление воздуха движению аэростата. С другой стороны, уже в Боровске Циолковский увлекся идеей аэроплана. В Калуге в 1895 г. он даже оформил свои мечты в виде предварительного расчета самолета. Этот расчет, снабженный чертежами, следует признать прекрасным образцом творческого прозрения Циолковского как инженера-изобретателя. Тип самолета, разработанного в основных чертах Циолковским, очень близок к современным, и весьма далек от старых конструкций Ланглейя, Сантос Дюмона и Райта. Само собой разумеется, что ни расчета винтомоторной группы, как мы ее сейчас понимаем, ни полной теории крыла, основанной на теории аэродинамики, Циолковский при этом не дал, да и не мог дать, но общий тип конструкции угадан им блестяще.

И вот при расчете своего аэроплана Циолковский столкнулся также с необходимостью оценить давление воздуха на двигающееся в нем крыло самолета. Эти оба технических проекта и привели его к проблеме изучения сопротивления движению в жидкостях и газах.

Первоначальные опыты Циолковского были очень просты и состояли в измерениях силы давления на пластинку, выставленную на ветер. Постепенно совершенствуя методику этих экспериментов, автор, однако, убедился в том, что для повышения точности необходимо иметь возможность создавать около пластинки более регулярное течение воздушных струй. Так совершенно самостоятельно он пришел одним из первых в мире, и во всяком случае первым в России, к идее устройства так называемой аэродинамической трубы. Такие трубы, или, как он их называл, воздуходувки, Циолковский устраивал у себя на квартире в Калуге. С их помощью было получено много интересных результатов относительно коэффициента сопротивления для тел различной формы. В настоящее время, разумеется, все эти данные уже устарели, но по тем временам Циолковский был один из первых, кто поставил подобные опыты. Его имя совершенно заслуженно поэтому цитируется например Рябушинским¹ наряду с именами пионеров вопроса — Дюшменом, Ланглеєм, Джевецким и др.

¹ Справедливость требует отметить, что в ряде книг по этому вопросу, например в книге Н. Е. Жуковского — „Теоретические основы воздухоплавания“ имя Циолковского совершенно не упоминается.

Один из наиболее интересных для самого Циолковского результатов заключался в том, что коэффициент сопротивления для тел, форма которых была подобна форме его дирижабля, у него получился значительно меньший, чем тот, который предсказывали консультанты и рецензенты работы о дирижабле из технического общества в своем отзыве. Особенно важно было и то, что этот коэффициент оказался убывающим при увеличении скорости.

Так Циолковский своими блестящими опытами ответил на голословные возражения Е. В. Федорова, докладывавшего его работу о дирижабле в техническом обществе и заключившего свой доклад знаменитыми словами: „аэростат должен навсегда силой вещей остаться игрушкой ветров“. Упорная работа над указанными вопросами продолжалась около десяти лет.

После первых успехов проектов дирижабля и одобрительных отзывов в печати, хотя и сопровождавшихся всяческими оговорками, по существу дела хоронившими самый проект, к Циолковскому стали поступать даже пожертвования различных частных лиц и обществ на воздухоплавание. Некоторые, впрочем, плохо разобравшись, жертвовали прямо „на бедность“. Изобретатель расстраивался и даже болел. Не нужно, впрочем, думать, что пожертвования были значительны: в сумме они составили около 55 рублей. Деньги были употреблены на постановку дальнейших опытов. В 1899 г. результаты работ и описание приборов были опубликованы Циолковским в „Вестнике опытной физики“ в статье „Давление воздуха на поверхности, введенные в искусственный воздушный поток“.

Работа была представлена в Академию наук. После благоприятного отзыва академика Рыкачева Академия выдала Циолковскому по его просьбе 470 руб. на производство дальнейших изысканий. Через полтора года Циолковский представил Академии доклад о произведенных новых опытах.

Как уже было сказано, и самые опыты, и приборы Циолковского, и его результаты были вполне на уровне современной ему науки, — экспериментальной аэродинамики — науки, одним из отцов которой он справедливо может считаться. Свои опыты Циолковский сопровождал и предварительными теоретическими расчетами. Основными мыслями, положенными в основу этих расчетов, были следующие. Сопротивление воздуха складывается из следующих составных частей: механическая затрата работы на расталкивание масс воздуха, встречающихся телу на пути, и работа, затрачиваемая на увлечение слоя воздуха, пристающего к телу. В дальнейших, более поздних работах Циолковский делал попытку учесть и работу, идущую на сжатие масс воздуха, предшествующих телу, и на расширение масс, последующих за телом.

Что касается и самых расчетов и описанной постановки проблемы, то при беспристрастном отношении их следует признать годными только для предварительной ориентировочной

прикидки порядка величин сопротивления. Действительно, для всякого хоть сколько нибудь знакомого с современной аэро- и гидродинамикой совершенно ясно, что ни один расчет движения в жидкости или газе *нельзя* произвести, не учитывая влияния образующихся при этом движений *вихрей*. Вся современная аэродинамика (Карман, Прандтль) построена именно на теории вихревого движения. Без этой теории непонятны ни теория несущих поверхностей самолета, ни теория винта, ни теория сопротивления движению. Правда, в некоторых случаях (малые скорости, удобообтекаемые формы тел и т. п.) можно для предварительного расчета пользоваться и теорией так называемого потенциального движения жидкости, но и здесь дело вовсе не сводится к тем простым эффектам, которые Циолковский кладет в основу своих расчетов. Циолковский полагает, что динамику сжимаемой жидкости можно рассматривать как частный случай динамики собраний частиц, не взаимодействующих между собой, а это не верно и приводит к ряду затруднений.

Итак теоретические соображения Циолковского, относящиеся к проблеме сопротивления движению тел в воздухе, не представляют особого интереса и годны лишь для предварительных подсчетов. Справедливость требует отметить, что и сам Циолковский невысокого мнения о своей теории. В книжке „Давление на плоскость“, изданной в Калуге в 1930 г., он пишет: „Предупреждаю, что все последующие расчеты нельзя считать ни точными, ни строго научными. Хорошо, если они дадут хотя бы некоторое понятие о величине давления на плоскость, нормальную к потоку...“.

Продолжались в Калуге и работы над моделями цельнометаллического дирижабля. Строились модели постепенно увеличивавшихся размеров, вводились новые усовершенствования в конструкции, пропагандировалась с небольшим успехом идея воздухоплавания. Но все неудачи не расхолаживали упорного горения Циолковского, и он продолжал свое дело.

В тот же период времени созрела и окончательно оформилась другая мечта Циолковского — о проекте межпланетного корабля, построенного по принципу ракеты. В 1903 г. была напечатана в „Научном обозрении“ статья „Исследование мировых пространств реактивными приборами“, в которой впервые в истории человечества были даны расчеты и доказательства *возможности* получения космических скоростей, достаточных для вылета за пределы сферы действия земного притяжения. Для более подробного знакомства с историей этого изобретения Циолковского мы отсылаем читателя к статье инж. Цандера, помещаемой во втором томе настоящего сборника трудов.

В связи с идеей межпланетных путешествий Циолковский много внимания посвящал и вопросам, связанным с этими путешествиями, снова, таким образом, после временного перерыва, затраченного на аэродинамические опыты, вернувшись к астрономическим темам. В этот период им выпущены были два фантастических сочинения: „На луне“ и „Грезы о земле и небе“. Оба

посвящены популяризации заветных мыслей автора о том, как хорошо было бы, если бы мы смогли освободиться от тяжести. Популяризируются и более мелкие проекты вспомогательного характера, относящиеся к идее межпланетного сообщения при помощи реактивных приборов. Попутно излагаются различные популярные сведения из астрономии. За подробностями мы отсылаем к этим книжкам в их переработанном виде, изданным в 1932—1933 гг. И в этот период и позже Циолковский дал немало статей популярного характера по астрономии. Признать эти статьи стоящими вполне на уровне современной им науки нельзя.

Цели систематизации отдельных этапов творчества Циолковского побуждают нас здесь ввести деление дореволюционного периода жизни в Калуге на две части, причем внешних фактов, мотивирующих это разделение, нет. Жизнь Циолковского в Калуге текла весьма однообразно. И мотивировать упомянутое разделение, например, тем, что в 1897 г. Циолковский временно получает уроки физики в реальном училище, или тем, что, лишившись этих уроков, он в 1898 г. получает место преподавателя физики в Калужском женском епархиальном училище, в связи с чем оставляет свое уездное училище, совсем, нет основания, да и хронологически эти факты не совпадают с предлагаемым делением.

Однако с точки зрения тематики трудов Циолковского деление намечается совершенно определенно. Период „бури и натиска“ в разработке основных изобретений Циолковского следует считать заканчивающимся примерно около 1903—1904 гг. К этому времени были закончены в основных чертах и проект металлического дирижабля, и проект реактивного межпланетного корабля, закончены в основном все аэродинамические опыты, законченным также оказался в принципиальных чертах и проект аэроплана, потерявший к этому времени уже в глазах автора свое значение (Циолковский окончательно утвердился в мысли, что дирижабль выгоднее самолета).

Своеобразен указанный период также и с точки зрения внешних успехов распространения предложений и изобретений Циолковского и их оценки со стороны. Действительно, начавшийся с Боровска успех продолжал и в первую часть жизни в Калуге улыбаться изобретателю. Как уже было указано, за это время имели место такие факты, как благоприятный отзыв Академии об экспериментах с сопротивлением воздуха, к этому же времени относится и попытка Голубицкого и некоторых иных почитателей Циолковского создать известного рода общественное мнение вокруг изобретений Циолковского, организовать сбор средств на осуществление изобретений и пр. Как ни мизерны были результаты этой кампании, все же следует отметить, что она имела место.

И случайно или нет, но этот период с конца жизни в Боровске, примерно с 1887, г., по устанавливаемый нами здесь срок — 1903—1904 гг., был периодом и наиболее интенсивного

творчества самого изобретателя. Обнимает эта пора расцвета творческих сил период с 30 по 46-й год его жизни.

Остановимся несколько на методике работы Циолковского в течение этого периода, давшего в сущности все его главные изобретения.

Вот что пишет по этому поводу в своей уже цитированной книге „Циолковский, его жизнь и изобретения“ Я. Перельман, в главе „Как надо изобретать“: „Глубоким заблуждением было бы думать, „что самоучка чистой крови“, как называет себя Циолковский, создает свои проекты кустарно, дилетантски, работая больше „на-глазок“, по счастливому наитию, чем на основе строго научного расчета. Нет, технические его идеи — плод систематических размышлений, тщательных изысканий, многократных опытов и математических вычислений...“. И дальше, сравнивая Циолковского с Эдисоном, Перельман говорит: „Эдисон также работал над своими изобретениями с беспримерным трудолюбием; каждый его успех — это по его собственным словам „один процент творчества и девяносто девять процентов пота“. Но Эдисон обычно шел ощупью, чисто опытным путем, между тем как Циолковский на данных опыта строил обобщающую теорию, позволяющую ему предвидеть результаты дальнейшего экспериментирования“.

С приведенными словами Перельмана нельзя не согласиться. Работа Циолковского, действительно, не имеет характера исключительно эмпирического нащупывания неизвестных результатов, и результаты своих опытов Циолковский предвидел на основе построенных им обобщающих соображений. Единственное, что остается при этом заметить, это только то, что обобщения и теории Циолковского всегда были весьма упрощены и снабжались хотя и объемистыми и пространными, но в высшей степени элементарными расчетами. Поэтому, между прочим, его выкладки так и громоздки. Основные положения его теоретических подсчетов также носили несколько своеобразный отпечаток. Они строились на основе принципа сведения исследуемого явления на самые простейшие виды движений (для примера напомним читателю о теории, которой сопровождал свои аэродинамические опыты Циолковский).

Из сказанного следует, что основные установки мышления Циолковского, которые были отмечены нами при описании его жизни в Москве, все полностью остались действенными и в пору наибольшего расцвета его творчества. Как методами своей теоретической работы, так и исходными принципами этого теоретизирования Циолковский пользуется почти в неизменном виде с самого юншества. Усложнялись технические изобретения, множились, развивались новые, но метод мышления Циолковский сохранил неизменным. Никаких новых методов теоретической работы, кроме выработанных в юншестве, Циолковский не принимал. Все кажущееся ему противным его упрощенным взглядам на строение вещества и законы его развития он отвергал просто и безапелляционно, как „философию“. Из цитаты, приведенной

выше, читатель мог убедиться в том, что в эту „философию“ попадали и Лобачевский, и Эйнштейн, и все прочие, которые хоть чуточку выходили за рамки упрощенческого отношения к миру, за рамки принципов наивного механистического материализма.

Математический аппарат Циолковского также не совершенствовался с конца периода жизни в Москве: начатки дифференциального и интегрального исчисления — и только...

И все же следует удивляться тому, что, орудуя этими примитивными установками мысли и примитивными средствами анализа, Циолковский смог дать своим гениальным изобретениям — самолета, дирижабля и ракеты — ту необходимую числовую аргументацию и поддержку, какая нужна для оправдания *возможности* их осуществления. Повсюду, где Циолковский ведет приблизительный расчет, он поистине удивительно чутко все упрощения, вводимые неточностями анализа, проводит так, что они дают погрешность в невыгодную для расчета сторону. Благодаря этому приему расчета с запасом точности на неучтенные обстоятельства и оказалось возможным для Циолковского создать в защиту и оправдание возможности реализации его изобретений очень убедительную аргументацию.

Указанная черта в методике работы Циолковского в высшей степени своеобразна и характеризует всю чуткость интуиции нашего самоучки. Владея весьма скромными средствами научного исследования, ведя свои работы почти не научным методом, исходя из упрощенных до извращения истинной сущности проблемы постановок, он смог провести расчет таким образом, что введенная погрешность все же не настолько велика, чтобы помешать пользоваться этим расчетом для предварительных соображений и, самое главное, направлена в определенную сторону, невыгодную для проекта.

Вторая часть жизни в Калуге. 1904—1917 гг.

Этот период ничем не замечателен с внешней стороны. Подрастали дети (всего их было 6 человек), учились в школах, кончали гимназии. Одна из дочерей училась на высших женских курсах в Москве; один из сыновей умер, будучи студентом. Другой, не окончив образования, сдал экзамен на учителя начальных училищ, подобно отцу; последний сын окончил бухгалтерские курсы.

Работа в епархиальном училище продолжалась. Тяготила глухота, мешала работать. Приходилось большей частью или объяснять или задавать решение задач на местах. При устных ответах ученицы должны были громко говорить почти около самого уха Циолковского. Попрежнему блестяще обстоило с физическими опытами.

За этот же период Циолковский перенес несколько болезней, но, верный своему отвращению к „медицинской латинской кухне“, ни разу не обращался к врачу. Однако переутомление стало



сказываться. Счастливый выход был найден в „физкультуре“: в возрасте 45 лет (1902 г.) Циолковский купил себе велосипед и с той поры сделался страстным велосипедистом (продолжает кататься даже и сейчас, спустя 30 лет). Велосипед заслонил любимый Циолковским в прежнее время водный спорт и коньки.

В отношении творческом этот период был периодом значительно менее интенсивным, чем предыдущий. Правда, время от времени Циолковский печатал в различных журналах свои статьи о дирижабле, и ракете. Но существенно нового ничего не вносил в свои предыдущие изобретения: дополнялись детали, развивались вспомогательные соображения, но в основном пытался лишь пропагандировать свои мысли и снова добиться их уже окончательного на этот раз признания.

А с признанием становилось все хуже и хуже. Годы революции (1904—1905), не задевшей, кстати сказать, лично Циолковского, и годы последующей реакции были годами упадка интереса к Циолковскому со стороны русского общества. Техни-

ческое общество давало все более и более суровые отзывы на работы, представляемые ему Циолковским. Работа, излагающая принципы реактивного прибора для межпланетных сообщений (1903 г.), была окончательно забыта — настолько, что когда в 1912 г. Циолковский опубликовал в „Вестнике воздухоплавания“ эту работу с некоторыми дополнениями вторично, то ряд зарубежных авторов заявили свои права на первенство изобретения, только ссылка на статью 1903 г. спасла право на первенство Циолковского.

К тому же периоду относится и получение Циолковским патентов на изобретенную им оболочку для металлического дирижабля в ряде стран — Германии, Франции и т. д. Заявки эти были начаты в 1910 г. Тогда же Циолковский делал попытки продать свои патенты, предлагая комиссионеру 25% с вырученной суммы. Эта попытка не имела никаких последствий.

Весной 1914 г. Циолковского пригласили на воздухоплавательный съезд в Петербург. Он прочел там большой доклад и иллюстрировал его диапозитивами, изображающими модели металлического дирижабля, а также моделью длиной в 2 м. Проект встретил неодобрительную критику Н. Е. Жуковского.

Итак, описываемые годы были для Циолковского годами не удач и постепенного отмирания интереса к его делу у общества. Все это, несомненно, должно было сказаться и на самом изобретателе. Он не потерял веры в свое дело, не сложил рук, продолжал пытаться вести борьбу с недоверчивым и пренебрежительным отношением правительства и общества. Но все его призывы поверить, проверить, дать средства, дать возможность продолжать дело были бесплодны. К началу революции дело Циолковского казалось окончательно похороненным, и не было надежды, что оно может воскреснуть. Иссякали силы и у самого изобретателя. Несокрушимая, казалось бы, воля к борьбе надламывалась. Это были годы с 1910 по 1917 — годы реакции и удушения общественных сил.

Между прочим, к этим годам относятся некоторые попытки Циолковского выступить на фронте чистой науки. Мы имеем в виду его статьи „Образование земли“ (1915), „Второе начало термодинамики“ (1914) и первые попытки изложить свое философское мировоззрение в виде своеобразной смеси пророчеств о будущем человечества и собственных точек зрения на философию жизни в настоящем — „Нирвана“ (Калуга, 1914).

„Образование земли и солнечных систем“ содержит изложение общих соображений относительно происхождения планетной системы. Если не обращать внимания на довольно путаное и неясное изложение старой космогонической гипотезы Лапласа, причем имя Лапласа нигде не упоминается в статье, и смутных соображений о величии миров и будущей жизни человечества, то статья никакого интереса не представляет. Также смутно и сбивчиво изложение философии жизни в „Нирване“. Проникаешься, правда, уважением к оптимизму автора и его горячей любви ко всему человечеству, но ничего конкретного и



К. Э. Циолковский в 1912 г.

определенного из этой книжки не выносишь.¹⁶ Всюду рассыпаны призывы, напоминания, повторения о дирижабле с металлической оболочкой и реактивном приборе. Пожалуй, истинный смысл этих статей автора, как и многих последовавших за ними в дальнейшие годы его жизни, только такой: Циолковский верит в то, что использование его названных двух изобретений принесет человечеству новые неисчерпаемые возможности, сможет позволить людям перестроить жизнь совершенно по-новому, и вот Циолковский кричит всему миру: „Слушайте, слушайте, мое изобретение несет вам всем счастье“. Таков по нашему мнению смысл всей литературы, которая собирается в биографиях Циолковского в объемистый список под названием „философия“. Никакой философии ни в точном, ни в приближенном смысле этого слова здесь нет — только своеобразный вид технической пропаганды металлического дирижабля и ракеты. Что касается психологической подкладки этой „философии“, то в ней ясно видно двигающее ее внутреннее противоречие скромности человека и гордости „пророка“, о котором говорилось выше.

Несколько сложнее обстоит дело с анализом статьи, посвященной второму закону термодинамики. В ней автор совершенно правильно указывает на то, что в газе, помещенном в поле тяжести, термодинамическое равновесие вовсе не совпадает с состоянием равномерного распределения температур. Этот эффект был известен физике под названием термодинамического парадокса до Циолковского. Циолковский пришел к своим заключениям, по всей видимости, совершенно самостоятельно. Однако цель, которую ставил себе Циолковский, излагая этот кажущийся парадокс — опровержение при его помощи второго закона термодинамики, *кажется* достигнутой только ввиду наличия ошибок в дальнейших рассуждениях Циолковского.

Покажем кратко эту ошибку. Имеется в пространстве некоторая масса газа, окружающая довольно массивное центральное тело; назовем его солнцем. Под влиянием тяготения солнца постепенно установится такой режим распределения скоростей и плотностей частиц газа, что плотность и температура, вначале равномерные, будут при приближении к солнцу возрастать. Из этого Циолковский заключил, что этот эффект равносителен нарушению второго начала термодинамики, гласящего в его наиболее правильной редакции, что самым вероятным направлением течения термодинамических процессов в мире является то, в котором энтропия данной системы, т. е. величина, меряющая степень рассеяния тепловой энергии, будет возрастать. Ошибка Циолковского заключается в том, что он забывает о лучеиспускании тепла, его гипотетической массы газа в окружающее пространство. Если бы он о нем вспомнил, то стало бы совершенно ясно, что, несмотря на местное нарушение принципа выравнивания температур, принцип возрастания степени рассеянности энергии во всем мире остается во всей своей силе.

Таким образом все выводы, которые Циолковский строит на основе своего парадокса, выводы о бесконечной продолжительности жизни светил и т. п., автоматически отпадают. Заметим, однако, здесь, что современная физика и термодинамика, построенные на основе квантовой теории, по-своему разрешают вопрос о втором начале термодинамики и соответственно этому о возможности или невозможности тепловой смерти вселенной. Но работы Циолковского это никак не касается, потому что его заключение может критиковаться лишь с точки зрения старых теорий — кинетической термодинамики. А там они оказываются построенными на недоразумении...

К этому же времени следует отнести начало одной весьма незаметной для беглого взгляда, но самой крупной, по нашему мнению, с точки зрения научной ценности астрономической работы Циолковского. Мы говорим о статьях: „Образование солнечных систем“ и „Дополнение к образованию солнечных систем“, напечатанных в Калуге уже после революции. Начата же была работа над этим вопросом именно в рассматриваемый период — около 1914 г.

Смысл и содержание названных двух статей в том, что в них

автор пытается дать расчет процесса образования планетной системы, исходя из соображений, которые очень близки к современным взглядам на этот вопрос, именно учитывается и сила приливного трения, и эффект потери массы путем лучеиспускания, и некоторые другие побочные силы. Весь расчет автор ведет по своему обыкновению весьма элементарными средствами анализа, тем самым резко упрощая все исследование в смысле точности его постановки и в смысле полноты получаемых результатов.

Странным, быть может, покажется для посторонних, но понятным для внимательного наблюдателя и исследователя методики работы Циолковского, то, что в этой космогонической работе автор пользуется в полной мере своим испытанным боевым средством—интуитивной догадкой. Он находит путь проведения примерного расчета без всяких дифференциальных, интегро-дифференциальных уравнений—одними средствами элементарного анализа.

Не нужно думать, что в этих работах Циолковского содержатся результаты, переворачивающие современную космогонию. Однако эта попытка элементарного решения вопросов, которые космогонисты решают порой при помощи весьма тяжеловесных методов, весьма ценна и заслуживает более внимательного отношения, чем это имело место до сих пор. До сих пор (1933 г.) этой работы Циолковского не знал ни один астроном-космогонист, в 1933 г. эта работа была предложена на предмет разбора и истолкования с точки зрения более употребительных в космогонии приемов исследования одному из студентов МГУ, как тема для дипломной работы.

Революция. Выход в отставку. Подъем творческих сил. Признание заслуг. Реализация изобретений

К началу революции 1917 г. Циолковскому было уже 60 лет. Период неудач и депрессии дал себя знать. Силы изобретателя сходили на-нет.

С начала Октябрьской революции Циолковский особенно радостно переживал реорганизацию школы. Работа в новой трудовой советской школе радовала этого неисправимого оптимиста и гражданина вселенной, как он сам себя называет. Во многом изменилась обстановка и окружение. Вот характерное признание самого Циолковского: „...Только после революции, когда я попал в трудовую советскую школу второй ступени, отношение ко мне переменилось и я почувствовал радость свободной работы в условиях нормальных взаимоотношений. Меня радовала свобода преподавания, отсутствие экзаменов, отметок и товарищеское отношение с учениками“.

В 1919 г. Циолковский направляет в Социалистическую академию (позже — Коммунистическую) свою автобиографию. Его утверждают членом этой Академии. Это был первый шаг признания Циолковского и его заслуг советской властью и общественностью.



В 1920 г. он по болезни в возрасте 63 лет выходит в отставку и прекращает педагогическую работу, имея стаж в 38 лет непрерывной работы в средней школе. Ему назначают академический паек, ЦЕКУБУ выдает ему денежную премию; наконец особым постановлением правительства РСФСР Циолковскому назначается персональная пенсия.

Этот краткий перечень показывает всю интенсивность той работы, которой советское государство окружило старика, поддерживая его, как раз в тот период времени, когда, казалось, силы Циолковского уже иссякают и дальше он бороться не сможет. Это внимание к нему самому, внимание и интерес, проявленные к его изобретениям со стороны общественности, дают новые силы и вливают новую бодрость в творческий дух изобретателя. Достаточно для характеристики этой вспышки деятельности привести следующие данные: за период с 1919 по 1930 гг. Циолковским написано и издано около тридцати книжек, брошюр и статей на разные темы. Что же касается предыдущих лет, то за все время с первого печатного выступления в 1891 г. по 1917 г. им было опубликовано примерно такое же количество работ. Большинство работ Циолковского издавалось до самого последнего времени в Калуге на собственные средства автора и бесплатно рассылалось им всем желающим. После революции им дан ряд новых изобретений, например реактивный аэроплан, разработан новый тип стратоплана, построенного также на принципе ракеты, дан в высшей степени оригинальный проект сверх-

скоростного поезда,двигающегося без колес по особому бетонному полотну, опираясь на тонкий слой воздуха, с силой нагнетаемого в промежуток между полотном и дном аппарата.

Из нашего краткого жизнеописания периода упорной борьбы, долгих лет борьбы за право на жизнь своих изобретений, борьбы с косностью и рутинной как правительств царской России, так и официальных пломбированных специалистов было видно и упорство Циолковского, и его действительно несокрушимая воля к борьбе. Он твердо верил в свои „обворожительные мечты“ и бился, как подобает истинному герою, за их осуществление.

Признание достоинств этого человека, оценку его заслуг и бескорыстного служения делу прогресса человечества могла принести с собой только пролетарская революция. Вот несколько фраз из автобиографии этого гениального изобретателя и борца за мечту:

„При советском правительстве, обеспеченный пенсией, я мог свободнее отдаться своим трудам и, почти не замеченный прежде, я возбудил теперь внимание к своим работам. Мой дирижабль признан особо важным изобретением. Для исследования реактивного движения образовался ГИРД (группа изучения реактивного движения). О моих трудах и достижениях появлялось много статей в газетах и журналах. Мое семидесятилетие было отмечено прессой. Через пять лет мой юбилей даже торжественно отпраздновали в Калуге и Москве“.

Политика партии, советского правительства по отношению к изобретательству нашла блестящее выражение в этом полном признании заслуг Циолковского и этом заботливом отношении к его трудам и его личности.

Семидесятипятилетний юбилей Циолковского в Калуге и в Москве вылился в торжественный праздник советских общественных организаций. И этот праздник был не только чествованием Циолковского, но и праздником всего советского изобретательства, торжеством передовиков производства, рационализаторов, изобретателей, ударников труда и обороны. Прочтите книжку: „К. Э. Циолковский“, выпущенную Госавиаавтоиздатом после юбилея. Там вы найдете захватывающие страницы описаний торжества в Калуге. Там вы найдете простые слова стенограмм, от которых делается и радостно и бодро.

В своей автобиографии Циолковский спрашивает в одном месте: „Оправдал ли я тот хлеб, который ел в продолжение 75 лет?“

Прочтите стенограммы юбилейных собраний, там вы найдете, как ответило правительство, наградившее Циолковского орденом Красного трудового знамени, как ответили партия и советская общественность на этот вопрос.

Годы борьбы окончены, Циолковский признан. Скромный домик на улице Брута в Калуге стоит все также и на том же месте, но уж на улице имени Циолковского.

При Дирижаблестрое работает специальный отдел цельнометаллических дирижаблей Циолковского; там десятки инженеров

трудятся над осуществлением заветной мечты Циолковского. Существует и группа изучения реактивного движения, разрабатывающая проекты аппаратов, построенных на принципе ракеты Циолковского.

Кипит работа в Советском союзе над реализацией „обворожительных мечтаний“ нашего самоучки и великого изобретателя. Отдадим ему должное, но не будем приписывать ему таких свойств и черт его характера, которыми он не обладает. Не будем возводить его в сан великого всемогущего всезнайки и пророка. Это было бы по меньшей мере непочтительно. Сознаемся в том, что он не является ни настоящим философом, ни астрономом, ни физиком, ни биологом. Выступления его на этих фронтах внутренне мотивированы и оправданы все теми же великолепными техническими проектами. Не будем уверять и себя, и его в том, что мы не понимаем истинной ценности Циолковского как изобретателя, давшего миру прекрасные изобретения, сумевшего их мотивировать и снабдить расчетом, несмотря на отсутствие у самого изобретателя и сложной аппаратуры математического анализа и систематических сведений из области точных наук. Поймем и то, что обстоятельства жизни и природные особенности не позволяли Циолковскому выйти из скорлупки замкнутости, не позволяют и теперь сделаться фактическим учителем и непосредственным руководителем десятков людей, работающих по заданиям партии и правительства над осуществлением его изобретений.

„СССР идет усиленно, напряженно по великому пути индустриализации страны и построения бесклассового общества, и я не могу этому не сочувствовать и горячо не приветствовать борцов за это дело...“. Кончает Циолковский свою автобиографию.

Борцы за социализм приветствуют тебя, товарищ Циолковский, упорный борец за счастье человечества, которому на службу пойдут и твой дирижабль, и твоя ракета... Не обижайся на то, что высоко ценя твои истинные заслуги, все же не лжем и не делаем вид, что ошибки твои нам кажутся проявлением сверхчеловеческой мудрости.

Н. Моисеев

Декабрь 1933

От редактора

Суд современников, дающих оценку великому человеку, исключительно трудная вещь.

Поэтому немудрено, что в очерке биографии К. Циолковского, составленном проф. Моисеевым, есть ряд догадок, подчас необоснованных, и ряд спорных мест.

Распространенное мнение, что Циолковский всю жизнь являлся принципиальным одиночкой не является бесспорным. Связь Циолковского с Д. И. Мен-

делеевым, его безуспешные обращения в Императорское техническое общество, связь с Обществом любителей естествознания, попытки перевестись в Москву, связь с Академией наук, поддерживавшей одно время его работы, его разносторонняя литературная деятельность — говорят о противоположном. Но все же одиночество Циолковского в его работе — факт несомненный.

По нашему мнению корни этого одиночества лежат в том непонимании и враждебно-насмешливом отношении, которое проявила техническая интеллигенция парской России к идеям Циолковского, идеям, вносящим революцию в технику передвижения.

Доклад Циолковского в 1887 г. показал, что трудно передать людям новые мысли, выходящие из круга их обычных представлений, как бы ясно эти мысли изложены ни были. В 1890 г. Императорское русское техническое общество забраковало проект цельнометаллического дирижабля на том основании, что „аэростат должен силою вещей навеки остаться игрушкой ветров“.

Циолковский не согласился с этим смертным приговором. Мало того, он осмелился жестоко критиковать в печати своих противников. Такого рода „задор“ был, по мнению самого Циолковского, одной из причин его разрыва с научно-техническим миром.

В 1899 г. Циолковский производит опыт со своей первой воздушной подушкой. Результаты встречены довольно благосклонно. Но когда построена вторая труба, снабженная, насколько нам известно, первой в мире спрямляющей решеткой, и отчет об опытах с ней отправлен в Академию наук, начинается обычная история: отчет напечатать нельзя, так как „ненаучен“ самый метод применения аэродинамической трубы с искусственным потоком. „Ненаучен“ до тех пор, пока его не применили Рябушинский и Жуковский.

В 1904 г., под влиянием друзей и группы калужских инженеров, Циолковский снова обращается в Императорское техническое общество с новым проектом цельнометаллического дирижабля, но безрезультатно; предложение по существу не рассматривается, как отвергнутое уже в 1890 г.

Эти примеры дают ясное представление о том отношении, которое встречали работы Циолковского, необычным языком говорящие о необычных и новых вещах.

Хронологический список сочинений К. Э. Циолковского¹.

Составлено проф. Н. А. Рыным

Книги и статьи

1891 г.

1. Давление жидкости на равномерно движущуюся в ней плоскость, Труды Общества любителей естествознания, физический отдел, т. IV, Москва.

2. Как предохранить нежные вещи от толчков (4), Труды Общества любителей естествознания, физический отдел, т. IV, Москва.

1892 г.

3. Аэростат металлический, управляемый (83), вып. 1, изд. С. Е. Чертова, Москва.

1893 г.

4. Аэростат металлический, управляемый, вып. 2, Калуга (116), изд. автора (переведено на французский, немецкий и английский языки).

5. Возможен ли металлический аэростат (8), „Наука и жизнь“, № 51—52, Москва.

6. Тяготение как источник мировой энергии (22), „Наука и жизнь“, Москва.

7. На луне (фантастическая повесть). (48), Москва, отдельная книжка изд. Сытина, а также в ж. „Вокруг света“.

1894 г.

8. Аэроплан или птицеподобная (авиационная) летательная машина (46), журн. „Наука и жизнь“, № 43—44 и № 45—46, Москва.

1895 г.

9. Повторение предыдущей работы в виде отдельной книжки, Москва, университетская типография.

10. Грезы о земле и небе и эффекты всемирного тяготения (143), изд. А. Гончарова, Москва.

1896 г.

11. Может ли земля заявить жителям иных планет о существовании на ней разумных существ (1), „Калужский вестник“, № 68, Калуга.

12. Железный управляемый аэростат на 200 человек (20), Калуга, изд. автора.

1897 г.

13. Продолжительность лучеиспускания звезд (16), „Научное обозрение“, СПб.

1897 г.

14. Самостоятельное горизонтальное движение управляемого аэростата (новые формулы сопротивления воздуха и движения аэростата, „Вестник опытной физики и элементарной математики“ № 258 и 259, Одесса.

1898 г.

15. То же сочинение в отдельной книжке (22), Москва.

16. Простое учение о воздушном корабле (114) (приложение к ж. „Общедоступная техника“, Москва.

17. Давление воздуха на поверхности, введенные в искусственный поток, „Вестник опытной физики и элементарной математики“, №№ 269—272, Одесса

1899 г.

18. Отдельные оттиски предыдущей работы (32).

¹ Числа в скобках означают число страниц.

19. Сопротивление воздуха, ж. „Научное обозрение“, Москва.

1900 г.

20. Успехи воздухоплавания в XIX в., СПб. „Научное обозрение“, № 12 и приложение к нему „XIX век“, стр. 295 (10).

21. Вопросы воздухоплавания (по поводу Трудов по воздухоплаванию VII отдела Имп. русск. техн. о-ва за период 1895—1900 гг. (18), „Научное обозрение“, № 10, (18), СПб.

1901 г.

22—23. Отдельные оттиски предыдущих двух работ.

1903 г.

24. Исследование мировых пространств реактивными приборами (31), „Научное обозрение“, № 5, Москва.

25. Сопротивление воздуха и воздухоплавание (отдельный оттиск статьи 1899 г.) (22), Калуга, изд. автора.

1904 г.

26. Простое учение о воздушном корабле и его построении (105) (2-е изд. с добавлением автобиографии), Калуга, изд. автора.

1905 г.

27. Металлический воздушный корабль (5), СПб, ж. „Знание и искусство“, № 9.

1905—1908 гг.

28. Аэростат и аэроплан, СПб, ж. „Воздухоплаватель“, 1905 г., №№ 1, 2, 7, 10; 1906 г., №№ 4, 5, 11; 1907 г. №№ 3—4, 12 и 1908 г., № 8 (225).

1910 г.

29. Металлический мешок, изменяющий свой объем и форму в применении к управляемому аэростату и другим телам, ж. „Всемирное техническое обозрение“, СПб № 3; вышли в свет и отдельные оттиски, Калуга, изд. автора.

30. Металлический аэростат. Его выгоды и преимущества (12), ж. „Воздухоплаватель“, № 11 и „Аэро“, СПб.

31. „Реактивный прибор“, ж. „Воздухоплаватель“, № 2.

1911 г.

32. Защита аэронавта (8), Калуга, изд. автора.

33. Устройство летательного аппарата насекомых и птиц и способы их полета (12), ж. „Техника воздухоплавания“, № 3, СПб.

34. Отдельные оттиски этой статьи.

1911—1912 гг.

35. Исследование мировых пространств реактивными приборами, ж. „Вестник воздухоплавания“, 1911 г., №№ 18—22; 1912 г. № 249, СПб.

1913 г.

36. Первая модель чисто металлического аэронавта из волнистого железа (16), Калуга, изд. автора.

1914 г.

37. Исследование мировых пространств реактивными приборами (16) (дополнение к I и II частям труда того же названия), Калуга, изд. автора.

38. Простейший проект чисто металлического аэронавта из волнистого железа (10), Калуга, изд. автора.

39. Второе начало термодинамики (24), Калуга, изд. „Калужского общества изучения природы местного края“.

40. Без тяжести (научно-фантастический рассказ), Петроград, ж. „Природа и люди“, стр. 577 (перепечатка с некоторыми изменениями труда № 10, по настоящему списку).

41. Нирвана (16), Калуга, изд. автора.

1915 г.

42. Таблица дирижаблей из волнистого железа (24), Калуга.

43. Дополнительные технические данные к построению металлической оболочки дирижабля без дорогой верфи (6).

44. Отзыв Леденцовского общества о моем дирижабле (7), Калуга.

Работы 42, 43 и 44 — изд. лица, пожелавшего остаться неизвестным.

45. Образование земли и солнечных систем (21), Калуга, изд. автора.

46. Общий алфавит и язык, Калуга, изд. автора.

47. Знание и его распространение, Калуга, изд. автора.

1916 г.

48. Горе и гений (9), Калуга, изд. автора.

1918 г.

49. Воздушный транспорт (18), Калуга, изд. автора.

50. Гондола металлического дирижабля и органы его управления (26), Калуга, изд. автора.

51. Вне земли (фантастическая повесть), ж. „Природа и люди“, №№ 2—14.

1919 г.

52. Кинетическая теория света. Плотность эфира и его свойства (39), „Изв

Калужского общества изучения природы местного края", кн. 3-я.

53. Отдельные оттиски предыдущей работы, Калуга.

1920 г.

54. Богатства вселенной (24), Калуга, изд. автора.

55. Вне земли (повесть) (118), „Изв. Калужского общества изучения природы местного края“, Калуга.

1924 г.

56. История моего дирижабля (6), (приложение № 3 к „Известиям ассоциации натуралистов“), Москва.

57. Ракета в космическое пространство (32), изд. 2-е, со вступительной заметкой на немецком языке А. Л. Чижевского, Калуга, изд. автора.

58. Четыре способа носиться над сушей и водой, ж. „Воздухоплавание“, 1924 г., № 6—7, стр. 10.

1925 г.

59. Монизм вселенной (32) (конспект), Калуга, изд. автора.

60. Причина космоса (33) (конспект) (с добавлением отзывов о „Монизме вселенной“ и ответов на вопросы по поводу этой книжки), Калуга, изд. автора.

61. Образование солнечных систем (33), (извлечение из большой рукописи 1924—1925 гг.) и споры о причине космоса“, Калуга, изд. автора.

62. Порядок практических работ при постройке металлического дирижабля, ж. „Воздухоплавание“, № 4—5.

63. Дирижабль из волнистой стали, ж. „Техника и жизнь“, № 29.

64. История моего дирижабля, Москва, ж. „Огонек“, № 14.

1926 г.

65. Исследование мировых пространств реактивными приборами (перездание работ 1903 и 1911 гг. с некоторыми изменениями и дополнениями) (127), Калуга, изд. автора.

1927 г.

66. Сопротивление воздуха и скорый поезд (72), Калуга, изд. автора.

67. Общечеловеческая азбука, правописание и язык (11), Калуга, изд. автора.

68. Космическая ракета. Опытная подготовка (24), Калуга, изд. автора.

69. Изданные труды К. Э. Циолковского (24), Калуга, изд. автора.

1928 г.

70. Отклики литературные (40), Калуга, изд. автора.

71. Дополнение к „Образованию солнечных систем“ (17), Калуга, изд. автора.

72—74. Моя пишущая машина (12), „Двигатели прогресса“ (9), Новое о моем дирижабле и последние о нем отзывы, „Мелочи“ (7), Калуга, изд. автора.

75. Любовь к самому себе или истинное себялюбие (39), Калуга, изд. автора.

76. Ум и страсти (27), Калуга, изд. автора.

77. Будущее земли и человечества (28), Калуга, изд. автора.

78. Промедление земли (21), Калуга, изд. автора.

79. Воля вселенной. Неизвестные разумные силы (33), Калуга, изд. автора.

80. Общественная организация человечества (вычисления и таблицы) (32), Калуга, изд. автора.

81. Дирижабль из волнистой стали (17), Калуга, изд. автора.

82. Путешественник в мировые пространства, Автобиография (1), ж. „Огонек“, № 14, Москва.

1929 г.

83—85. Растение будущего (9) Животные космоса (19), Самозарождение (4), Калуга, изд. автора.

86. На луне (75), (фантастическая повесть), Москва, изд. „Молодая гвардия“, Лгр.

87. Космические ракетные поезда (с биографией К. Э. Циолковского С. В. Бессонова) изд. Калужского коллектива секции научных работников.

88. Цели звездоплавания (40), Калуга, изд. автора.

89. Достижимы ли планеты?

90—93. Новый аэроплан (39). За атмосферой земли (2), Реактивный двигатель (3), Отзывы о ракете (2), Калуга, изд. автора.

94. Современное состояние земли (36), Калуга, изд. автора.

95. От самолета к звездолету, Москва, ж. „Искры науки“, № 2, стр. 55.

1930 г.

96. Давление на плоскость при ее нормальном движении в воздухе (48), Калуга, изд. автора.

97. Стальной дирижабль, ж. „Авиация и химия“, № 4, стр. 11, Москва.

98. Научная этика (98), Калуга, изд. автора.

99. Звездоплавателям (32), Калуга, изд. автора.

100. Проект металлического дирижабля на 40 человек (112), Калуга, изд. автора.

101. Реактивный аэроплан (24), Калуга, изд. автора.

1931 г.

102. Дирижабли (32), Калуга, изд. автора.

103. „Атлас дирижабля из волнистой стали“ (24), Калуга, изд. автора.

104. „Сжиматель газов“ (36), Калуга, изд. автора.

105. „Монизм вселенной“ (84), Калуга, изд. автора.

106. „Металлический дирижабль с изменяющимся объемом“, ж. „Наука и техника“, № 61—62.

107. Как увеличить энергию взрывных (тепловых) двигателей (16), Калуга, изд. автора.

108. Каким должен быть дирижабль, ж. „Рабочее изобретательство“, № 1, Москва.

109. Дирижабль — основа воздушного транспорта, Москва, ж. „Рабочее изобретательство“, № 5.

110. Газы для дирижаблей, ж. „Рабочее изобретательство“, № 17, Москва.

111. Газовые воздушные корабли или аэронавы, Москва, ж. „Вестник инженеров и техников“, № 5.

112. Полуреактивный стратоплан (32), ж. „Хочу все знать“, № 29.

1932 г.

113. Стратоплан полуреактивный (33), Калуга, изд. автора.

114. Реактивное движение и его успехи, „Самолет“, № 6, стр. 17, Москва.

115. Плотность разных слоев атмосферы, ж. „Самолет“, № 8—9, стр. 36, Москва.

116. Новый тип дирижабля, ж. „В бой за технику“, № 17—18, стр. 21, Москва.

117. Теория реактивного движения, ж. „В бой за технику“, № 15—16, стр. 19, Москва.

118. Значение величины дирижабля, ж. „Вестник инженеров и техников“, № 3, Москва.

119. Некоторые пояснения к особенностям конструкции цельнометаллического дирижабля, ж. „Вестник инженеров и техников“, № 4, Москва.

120. Звездолет, ж. „Знание-сила“, № 23—24; Москва.

121. Батарейная воздуходувка для доми, ж. „Вестник инженеров и техников“, № 10, Москва.

122. Мой дирижабль и стратоплан, „Известия ВЦИК“, № 288, Москва.

123. „Черты из автобиографии“ и „Звездоплавание“, статьи в юбилейном сборнике „К. Э. Циолковский“, Госавиоавтоиздат, М. — Лгр.

1933 г.

124. На луне (140), Госавиоавтоиздат; М.-Лгр.

125. Тяжесть исчезла (фантастический очерк) (119), Госмашметиздат, М.-Лгр.

126. Дирижабль, стратоплан и звездолет как три ступени величайших достижений СССР, ж. „Гражданская авиация“, № 9, стр. 7, Москва.

127. Солнце и завоевание пустынь, ж. „Вестник знания“, № 5—6.

128. Программа работ по стальному дирижаблю, Техн. бюллетень Дирижаблестроя, № 4, Москва.

Рукописи

1883 г.

1. Теория газа.

2. Подобные организмы.

3. Изменение силы тяжести.

1886 г.

4. Теория аэростата.

1890 г.

5. К вопросу о летании посредством крыльев.

6. О возможности построения металлического аэростата.

1893 г.

7. Свободное от тяжести пространство.

1895 г.

8. Аэростат.

1896 г.

9. На планетах.

1901 г.

10. Отчет для Академии наук о сделанных мною опытах по сопротивлению воздуха.

1903 г.

11. Естественные основы нравственности.

1908 г.

12. Аэростат и аэроплан (продолжение напечатанной работы под таким же заглавием).

1915 г.

13. Выделение человека из царства животных

1916 г.

14. Развитие души и тела.

15. Образование простейших живых существ.

16. Условия жизни в других мирах.

1917 г.

17. Разговоры о металлическом дирижабле.

18. Идеальный строй жизни.

1918 г.

19. Механика и биология.

20. Свойства человека.

21. Современные общественные установления (33).

22. Как устроить общество и создать благосостояние.

23. Общественный строй.

24. Влияние роста существ.

25. Приключения атома (121).

26. Гений среди людей.

1919 г.

27. Первопричина.

28. На Весте (5).

29. Мысль (5).

30. Начало растений на земном шаре (46).

31. Почему трудно осуществить мой дирижабль.

1920 г.

32. Путешествие земли и солнца (29).

33. Воображение (10).

34. Общечеловеческие меры.

35. Влияние разной тяжести на жизнь.

36. Полюсы.

37. Пифагор.

38. Непротивление.

39. Происхождение животных и человека.

1921 г.

40. Мировые катастрофы (30).

41. Из прошлого земли (6).

42. Развитие органов размножения.

1923 г.

43. Энергия солнечного лучеиспускания (по отношению к движению небесных тел) (28).

44. Значение науки о веществе.

45. Темнота людей.

46. Гипотеза Бора и строение атома.

1924 г.

47. Вода в безводных и безоблачных пустынях (8).

48. Устройство жилищ в сухих и жарких пустынях (11).

49. Радость и страдание.

1926 г.

50. Простой солнечный нагреватель..

51. Галилейский мыслитель.

1927 г.

52. Условия биологической жизни во вселенной (9).

1928 г.

53. Образование солнечной системы (выводы) (3).

54. Совершенство вселенной (7).

55. Эфирный остров (13).

56. Теоремы жизни (служит пояснением к „Монизму“ и „Этике“ (12).

57. Что делать на земле (27).

1929 г.

58. Главные выводы из „Нового аэроплана“ (14).

59. Доступны ли планеты? (Ответ) (3).

60. Картина вселенной (28).

61. Общественное устройство (Отрывок) (9).

62. Руководители (11).

1930 г.

63. Эпоха дирижаблестроения.

64. Жизнь человечества.

65. Что я думаю и чем занимаюсь?

1931 г.

66. Обратимость явлений вообще.

67. Обратимость химических явлений..

68. Восходящее и ускоренное движение полуреактивного аэроплана.

69. Органический мир вселенной.

70. Пение и музыка.

1932 г.

71. Вещество.

72. Упругость.

73. Возможен ли вечный двигатель?

74. Дирижабль и ракета против катастроф.

75. Сколько планет?

76. Температура планет.

77. Есть ли бог?

1933 г.

78. Гидроплан-крыло.

79. Парогазовые турбины.

80. Комнатный охладитель в жаркую погоду.

81. Легкий, дешевый и могучий мотор..

Том I

**ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИЙ
ДИРИЖАБЛЬ**

Предисловие редактора

Выпускаемый том трудов К. Э. Циолковского „Цельнометаллический дирижабль“, посвященный его воздухоплавательным работам, начинается „Теорией металлического аэростата“, впервые напечатанной в журнале „Воздухоплаватель“ (1900—1908 г.) под названием „Аэростат и аэроплан“. Самый придирчивый просмотр этой редкой книги, весьма полезной для понимания работы всякого дирижабля, не потребовал никаких поправок в ее формулах и выводах, если не считать единственной найденной нами описки (изменен § 405), не повлекшей за собой неправильных выводов.

Главу VI (исследование поперечного сечения) мы дополнили изложением опытного решения этой задачи, заимствованного из книги „Аэростат, металлический управляемый“, вып. 2, 1893 г., не вошедшей в настоящий том (см. §§ 143—155), а в аналитической части (§§ 160—174) мы передвинули ось x -ов в соответствии с § 147, что привело к упрощению алгебраических преобразований.

В книгу не вошли по техническим причинам четыре неопубликованные главы, посвященные движению дирижабля, освещающие ряд эксплуатационных и экономических вопросов, в частности вопрос подогревания газа. Заканчивается первая часть тома главой о значении размеров аэростата.

Мы не включили в настоящий том прекрасную книжку „Простое учение о воздушном корабле“, разошедшуюся в двух изданиях, дающую в общедоступной форме, без единой формулы, описание и глубокую теорию дирижабля, потому что она в основном повторяет изложенные математическим языком выводы „Теории металлического аэростата“.

Чтобы не загромождать книгу, мы не включили в нее также и неопубликованного труда „Проект дирижабля 1921 г.“, частично использованного дальше. В нем достоин подражания, между прочим, метод автора — давать не проект одного дирижабля, а сразу серию проектов подобных дирижаблей разных объемов (от 2800 до 350 000 m^3). Представление об этом дает приводимая нами „Общая таблица“ из брошюры „Атлас дирижаблей“.

Как образец агитационной деятельности К. Циолковского мы перепечатываем его „Простейший проект чисто металлического аэронаута из волнистого железа“, 1914 г., а заканчиваем том

материалами из работы „Проект металлического дирижабля на 40 человек“ в исправленном автором виде и с расположением материала, измененным против порядка в брошюре изд. 1930 г.

В „Аэростате и аэроплане“ часть формул была набрана латинскими буквами, а часть — русскими. Мы все формулы перевели на латинский алфавит, отказавшись при этом от оригинальных обозначений К. Циолковского, дающего в своих формулах инициалы русских слов (например объем — Об, вес — В, давление — Д).

Разобраться в некоторых математических формулах нам помог проф. Л. М. Лихтенбаум. Весьма большую долю работы по подготовке тома (в том числе и выполнение заказов большинства чертежей) выполнил т. Н. Н. Кирсанов, инженер группы дирижабля Циолковского.

Будем надеяться, что выпуск настоящего тома пробудит новый интерес к насущной проблеме целиком металлического дирижабля и поможет рассеять то непонимание дирижабля Циолковского, которое встречается до сих пор не только в широких кругах, но и среди работников воздушного флота.

Я. Рапопорт.

Теория металлического аэростата

I. Условия равновесия, поднятия и опускания аэростата

Основные формулы

1. Силы, действующие на аэростат, разделяются на две главные группы. Первая действует по направлению, противоположному тяжести, и, следовательно, поднимает аэростат или стремится поднять. Величина этой поднимающей силы определяется на основании закона Архимеда формулой:

$$Q_{\Pi} = \gamma_B \cdot U,$$

где буквы означают последовательно: поднимающую силу ¹, плотность воздуха и объем аэростата.

2. Действие других сил совпадает с направлением тяжести и состоит из веса конструкции аэростата Q_K и веса заключенного в нем легкого газа Q_{Γ} . Вес пассажиров, топлива и вес других всевозможных грузов мы обозначим просто через $Q_{ГР}$. Таким образом опускающая сила $Q_{оп}$ выразится уравнением:

$$Q_{оп} = Q_K + \gamma_{\Gamma} \cdot U + Q_{ГР}.$$

3. Отношение между опускающей и поднимающей силами аэростата определит его поднятие, опускание и равновесие. Условие равновесия определяется уравнением:

$$Q_{\Pi} = Q_{оп} = \gamma_B \cdot U = Q_K + \gamma_{\Gamma} \cdot U + Q_{ГР}$$

или

$$U(\gamma_B - \gamma_{\Gamma}) = Q_K + Q_{ГР}.$$

4. Если это уравнение не удовлетворяется, то аэростат или поднимается, или опускается. В таком случае равнодействующая R равна:

$$R = Q_{\Pi} - Q_{оп} = (\gamma_B - \gamma_{\Gamma}) \cdot U - Q_K - Q_{ГР}$$

¹ Не следует смешивать эту „поднимающую силу“ воздуха Q_{Π} с фиктивной подъемной силой газа (заключенного в аэростате) $\Phi = (\gamma_{\Pi} - \gamma_{\Gamma}) U$.

и составляет разность между силами, поднимающими аэростат и опускающими его. Когда она положительна, аэростат поднимается, когда отрицательна — аэростат опускается, когда она равна нулю — аэростат соблюдает равновесие.

Влияние температуры и давления на величины, входящие в предыдущие формулы

5. Величины в данных нами уравнениях вообще переменны. Так, плотность воздуха, плотность газа и объем аэростата зависят от температуры вне и внутри оболочки аэростата, а также и от давления вне и внутри оболочки, а то и другое, в свою очередь, зависит от климатических, метеорологических и других влияний, — например, от высоты аэростата над уровнем океана.

6. Из физики известно, что изменения величин U , γ_B и γ_G выражаются следующими функциями абсолютной температуры T и давления p :

$$7. \quad \gamma_B = \gamma_{B_0} \cdot \frac{p_B}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T_B},$$

$$8. \quad \gamma_G = \gamma_{G_0} \cdot \frac{p_G}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T_G},$$

$$9. \quad U = U_0 \cdot \frac{p_0}{p_G} \cdot \frac{T_G}{T_0},$$

так как плотность всякого газа γ_G пропорциональна производимому на него давлению p_G и обратно пропорциональна его абсолютной температуре T_G , а зависимость же объема газа U от этих величин — обратная.

10. В этих формулах p_0 означает давление газа или воздуха на единицу площади при нормальной температуре (0°Ц) и давлении в 760 мм, также и U_0 — объем всего газа при тех же условиях; T_0 означает абсолютную температуру нуля, равную 273°Ц .

11. Вообще абсолютная температура выражается:

$$T = t + 273,$$

где t есть температура по Цельсию.

Впрочем в последних формулах можно подразумевать какие угодно давления, температуры, объемы и плотности, лишь бы величины эти, например T_0 , U_0 , γ_0 и p_0 , были соответствующие, т. е. объем U_0 должен относиться к температуре T_0 , плотности γ_0 и давлению p_0 ¹.

¹ Так, например, в настоящее время международная стандартная атмосфера принимает за нормальную температуру $+15^\circ\text{Ц}$, а не 0°Ц .

12. Теперь из уравнения (4) исключим переменные с помощью уравнений (7), (8) и (9); получим:

$$R = U_0 \left[\gamma_{B_0} \left(\frac{p_B}{p_\Gamma} \right) \cdot \left(\frac{T_\Gamma}{T_B} \right) - \gamma_{\Gamma_0} \right] - Q_K - Q_{\Gamma P}.$$

13. Из него видим, что равнодействующая R не изменяет своей величины, когда температуры неизменны, но давления изменяются, *оставаясь равными* между собой, что имеет место при беспрепятственном изменении объема аэростата, или когда его оболочка свободно изменяет свой объем. Равнодействующая также не

изменяется, если отношение $\frac{p_B}{p_\Gamma}$ сохраняется неизменным, т. е.

когда внешнее давление в определенное число раз больше или меньше внутреннего давления, хотя как то, так и другое может безгранично изменяться. Этот случай бывает тогда, когда объем аэростата или газа можно искусственно изменять, а вместе с тем — и давление внутреннего газа. Этот случай практического значения как будто не имеет, хотя Менье этого не находил *.

14. Равнодействующая не изменяется и при изменении температур, если только они равны вне и внутри аэростата; такое положение имеет место днем и ночью в пасмурную погоду, когда аэростат не изменяет высоты своей над уровнем моря. Также она не изменяется, когда температуры вне и внутри неравны, но отношение абсолютных температур $\frac{T_\Gamma}{T_B}$ сохраняется неизменным. Такой случай может быть применен ко всякому аэростату.

15. Наконец, равнодействующая неизменна, когда и давления и температуры неравны, но отношения $\frac{p_B}{p_\Gamma}$ и $\frac{T_\Gamma}{T_B}$ неизменны, или когда отношение произведений $\frac{p_B \cdot T_\Gamma}{p_\Gamma \cdot T_B}$ сохраняет свою величину. Заметим, что из формул (7) и (8) следует:

$$16. \quad \frac{\gamma_B}{\gamma_\Gamma} = \frac{\gamma_{B_0}}{\gamma_{\Gamma_0}} \cdot \left(\frac{p_B \cdot T_\Gamma}{p_\Gamma \cdot T_B} \right).$$

Следовательно, вместо последнего условия постоянства равнодействующей можем принять другое: для сохранения величины R нужно, чтобы отношение плотностей воздуха и газа $\frac{\gamma_B}{\gamma_\Gamma}$ не изменялось.

* Менье — автор первого проекта управляемого аэростата (умер в 1783 г.).

Прим. ред.

Стенки аэростата могут свободно сдвигаться и раздвигаться

17. В таком аэростате внешнее давление атмосферы p_B можно принять равным внутреннему давлению газа p_T ; тогда формула (12) примет вид:

$$R = U_0 \cdot \left[\gamma_{B_0} \left(\frac{T_T}{T_B} \right) - \gamma_{T_0} \right] - Q_K - Q_{TP}.$$

18. Отсюда видно, что равнодействующая R сохраняет свою величину, если отношение абсолютных температур $\frac{T_B}{T_T}$ будет постоянно, как бы при этом ни изменялись давление воздуха и газа, а следовательно, и объем его, или аэростата.

19. Так как $\frac{T_T}{T_B} = 1 + \frac{T_T - T_B}{T_B}$, то постоянство равнодействующей

можно обусловить еще постоянством отношения $\frac{T_T - T_B}{T_B}$, т. е. постоянством отношения разности температур вне и внутри аэростата к абсолютной температуре воздуха.

20. Пусть, например, температура воздуха по Цельсию будет последовательно: $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ (абсолютная температура будет на 273° больше). Температура газа, положим, будет вначале, или при 0°Ц , на 10° больше; тогда эта разность температур, для сохранения величины равнодействующей, будет возрастать при возвышении температуры воздуха, но весьма незначительно; именно, она последовательно будет: $10^\circ, 0, 10^\circ, 2, 10^\circ, 4, 10^\circ, 6, 10^\circ, 7, 10^\circ, 9, 11^\circ, 1, 11^\circ, 3, 11^\circ, 5$.

21. При понижении температуры воздуха она должна также незначительно уменьшаться.

Итак, температура окружающей аэростат атмосферы может чрезвычайно сильно колебаться; разность же температур, при условии сохранения величины равнодействующей, должна колебаться весьма мало.

На основании сказанного, для постоянства равнодействующей, найдем:

$$\frac{T_T - T_B}{T_B} = \text{const};$$

отсюда легко при разных данных температурах воздуха T_B вычислить разность $T_T - T_B$, что мы сейчас и сделали.

22. Простейший случай получим, когда не только давление вне и внутри будет одинаково, но когда и температуры равны или разность температур равна нулю.

Тогда уравнение (17) или (12) даст:

$$R = U_0 (\gamma_{B_0} - \gamma_{T_0}) - Q_K - Q_{TP}.$$

23. В это уравнение не входят ни температура, ни давление, а потому можем сказать: температура и давление не имеют никакого влияния на равнодействующую — на ее знак и величину.

Таким образом, если аэростат, свободно изменяющий свой объем, поднимается, то он и вечно будет подниматься под действием постоянной силы; если — опускается, то и будет опускаться с неизменной силой; если сохраняет равновесие ($R=0$), то оно не нарушится, когда температура или давление, или то и другое вместе претерпевают какие бы то ни было изменения или когда аэростат посторонней силой будет перенесен в такую среду, где температура и давление совершенно другие, лишь бы температура воздушной среды не разнилась от температуры заключенного в аэростате газа.

24. Все это справедливо, как мы видели (21), и в случае неодинаковой температуры, если только разность $T'_Г - T'_В$ немного изменяется сообразно изменению температуры воздуха; когда она повышается, разность немного должна возрасти, когда понижается, разность должна уменьшиться. Точнее это выражено в параграфах 18 и 19.

25. Когда объем аэростата под напором легкого газа свободно изменяется, то для величины равнодействующей имеем формулу (17). При незначительных изменениях температур газа и воздуха легко получить изменения подъемной силы аэростата, дифференцируя уравнение (17):

$$dR = U_0 \cdot \gamma_{B_0} \cdot \frac{T'_Г}{T'_В} \left(\frac{\partial T'_Г}{T'_Г} - \frac{\partial T'_В}{T'_В} \right).$$

26. Отсюда следует, что при увеличении температуры газа подъемная сила пропорционально возрастает, и наоборот; а при увеличении температуры воздуха подъемная сила уменьшается, и наоборот. Понятно, что давление атмосферы, равное давлению внутреннего газа, никакого влияния на величину равнодействующей не имеет.

27. Из формул (1), (7) и (9) получим для выражения поднимающей силы (Q_{II});

$$Q_{II} = \gamma_{B_0} \cdot U_0 \cdot \frac{T'_Г}{T'_В} \cdot \frac{p_B}{p'_Г}.$$

28. Но вследствие свободного расширения аэростата $p_B = p'_Г$, а потому формулу (25) можем написать так:

$$dR = Q_{II} \cdot \left(\frac{\partial T'_Г}{T'_В} - \frac{\partial T'_В}{T'_В} \right).$$

29. Отсюда легко видеть отношение приращения подъемной силы dR к ее полной величине — (Q_{II}). Если, например, темпера-

тура газа и воздуха была сначала одинакова, например 300° (абсолютная равна $273 + 27$), а потом увеличилась на 1° , то относительное увеличение подъемной силы в случае повышения температуры газа составит $1/300$. При таком же повышении температуры воздуха она уменьшится на $1/300$.

30. Незменяемость подъемной силы обуславливается равенством:

$$\frac{\partial T_G}{T_G} = \frac{\partial T_B}{T_B}, \text{ или } \frac{\partial T_G}{\partial T_B} = \frac{T_G}{T_B},$$

полученным от приравнения второй части равенства (28) нулю.

31. Температура воздуха и газа меняется каждую секунду естественным образом. Если это изменение происходит одновременно и одинаково как для газа, так и для воздуха или подчиняется условию (30), то такое изменение не может нарушить величины равнодействующей или равновесие аэростата. Равные температуры внутри и вне аэростата бывают обыкновенно днем и ночью при пасмурной погоде.

32. В противном случае они неодинаковы и не подчиняются строго закону (30). Разница между температурами газа и воздуха будет зависеть днем от степени прозрачности воздуха, от облачности, от высоты солнца, от положения аэростата относительно направления солнечных лучей, от состояния поверхности оболочки, от степени покрытия ее снегом или влагой. Днем при ясном небе температура газа вследствие нагревания оболочки солнцем будет вообще выше градусов на 20. На разницу температур также окажет влияние быстрота самостоятельного горизонтального движения аэростата, а также быстрота восхождения его или опускания.

33. Ночью, при ясном небе, температура газа вообще ниже температуры окружающего воздуха, что зависит от охлаждения оболочки путем лучеиспускания. Разница эта также зависит от степени прозрачности воздуха, от облачности, от состояния оболочки аэростата, от близости к земной поверхности, от состояния этой поверхности или от температуры ее, что имеет влияние и днем, от движения аэростата и пр.

34. Отсюда видно, что как днем, так и ночью, кроме исключительных условий, подъемная сила аэростата или равнодействующая должна непрерывно изменяться. Также достигнутое нагрузкой равновесие воздушного корабля от метеорологических и топографических влияний должно непрерывно нарушаться, так что высота аэростата над уровнем океана должна постоянно меняться.

35. Но у нас есть могучий фактор противодействовать всем этим влияниям, нарушающим равновесие воздушного корабля, это — искусственное изменение температуры газа. Для этого температура газа T_G держится искусственно значительно выше температуры окружающего аэростат воздуха. Когда нужно, температура газа понижается посредством убавления притока тепла внутрь аэростата или еще более повышается посредством уси-

ления притока тепла. Тогда мы достигнем постоянства отношения $\frac{T_G}{T_B}$, а следовательно, и постоянства равнодействующей R .

Таким образом, если она равна нулю, то и останется равной нулю, т. е. аэростат будет сохранять равновесие, несмотря на влияния — метеорологические и др.

Объем газа или объем аэростата не может изменяться

36. Положим, что объем газоместителя не может ни увеличиваться, ни уменьшаться. Первое бывает тогда, когда аэростат наполнен совершенно; то и другое вместе также может быть, когда стенки газоместителя вследствие своей жесткости, толщины перегородок и т. п. сопротивляются их сближению.

Чаще это бывает тогда, когда давление внутри оболочки значительно более, чем снаружи.

Тогда внутреннее напряжение газа препятствует до известного предела уменьшению объема аэростата.

Из формулы (4) найдем:

$$R = \gamma_B \cdot U - \gamma_G \cdot U - Q_K - Q_{GP}.$$

37. В уравнении будут только две переменных величины — R и γ_B . Поэтому приращение Δ равнодействующей будет равно:

$$\Delta R = U \cdot \Delta \gamma_B.$$

Следовательно, равнодействующая увеличивается с увеличением плотности окружающего аэростат воздуха, и наоборот.

38. Допустим, например, что равнодействующая R равна нулю, т. е. аэростат находится в равновесии.

Тогда это равновесие может нарушиться от следующих причин:

а) от увеличения плотности окружающего аэростат воздуха, вследствие чего аэростат будет подниматься, пока плотность не уменьшится на ту же величину $\Delta \gamma_B$;

б) от уменьшения плотности воздуха, отчего аэростат опустится до слоя воздуха с первоначальной плотностью.

39. Сказанное можно выразить в зависимости от изменения температуры и давления воздуха.

Дифференцируя уравнение (7), найдем:

$$d\gamma_B = \gamma_{B_0} \cdot \frac{T_G}{T_B} \cdot \frac{p_B}{p_0} \left(\frac{\partial p_B}{p_B} - \frac{\partial T_B}{T_B} \right).$$

Отсюда видно, что с увеличением барометрического давления (при неизменной температуре) плотность воздуха, а следовательно, и равнодействующая, увеличивается, отчего аэростат должен подниматься, если ранее находился в равновесии, и наоборот.

С возрастанием температуры воздуха плотность его, а следовательно, и равнодействующая, должна уменьшиться, вследствие чего аэростат должен опускаться, если ранее находился

в равновесии. Понижение температуры вызывает обратное явление.

40. При одновременном изменении температуры и давления воздуха равнодействующая останется прежней, или равновесие не нарушится, при условии (39):

$$\frac{\partial p_B}{p_B} = \frac{\partial T_B}{T_B},$$

т. е. относительные приращения температуры и давления должны быть одинаковы.

При увеличении давления и уменьшении температуры, понятно, равнодействующая дважды получает приращение.

41. На основании уравнения (7) формулу (39) преобразуем так:

$$d\gamma_B = \gamma_B \left(\frac{\partial p_B}{p_B} = \frac{\partial T_B}{T_B} \right),$$

а помножая обе части уравнения на объем U , получим:

$$U \cdot d\gamma_B = U \cdot \gamma_B \left(\frac{\partial p_B}{p_B} - \frac{\partial T_B}{T_B} \right).$$

Поэтому на основании уравнения (1) скажем: относительное приращение подъемной силы к полной поднимающей силе выражается формулой:

$$\frac{U \cdot d\gamma_B}{U \cdot \gamma_B} = \frac{dQ_{II}}{Q_{II}} = \frac{\partial p_B}{p_B} - \frac{\partial T_B}{T_B}.$$

42. Мы говорим про давление воздуха p_B , окружающего аэростат. Но давление это у разных частей аэростата неодинаково. В высших его частях оно меньше, чем в низших. Можно подразумевать под величиной p_B среднее давление. Кроме того, что давление внутреннего газа также не может считаться одинаковым в разных частях внутри аэростата, оно еще зависит и от степени его наполнения легким газом. Так что наше положение относительно аэростата с свободно изменяющимся объемом не совсем точно.

Давление вне p_B может быть только приблизительно равно давлению внутри p_r . Также наполненный и надутый аэростат не может, говоря строго, сохранять свой объем неизменяемым, несмотря на изменение разности давления вне и внутри аэростата.

Из всего этого видно, что наши предыдущие формулы не могут считаться идеально точными. Они представляют только один шаг к познанию некоторых истин. Другой шаг может приблизить их к нам еще, но тогда уже формулы будут значительно сложнее.

43. Для полноты картины мы тут привели и формулы, относящиеся к аэростату, не изменяющему свой объем, но такой

аэростат на практике не выдерживает критики. Действительно, такой аэростат должен быть раздут, так что давление газа внутри значительно больше, чем наружное давление воздуха. Эта разность давлений требует особенной крепости оболочки. Кроме того, возрастание этой разности вследствие повышения внутренней температуры и вследствие понижения барометрического давления (или поднятия аэростата) способствует разрыву оболочки или, в лучшем случае, потере газа.

Постоянство объема газа лишает также аэростат способности изменять свою подъемную силу или сохранять равновесие посредством изменения температуры этого газа без потери балласта и газа.

II. Изменение объема аэростата

44. На практике аэростат не может беспредельно увеличивать свой объем, и потому мы определим, на какую именно величину должен увеличиваться этот объем от влияния действующих в природе сил. Это очень важно, так как незнание величины расширения заключенного в оболочке газа может повлечь за собой разрыв ее или потерю газа—в случае исправного действия предохранительного клапана.

45. Если при абсолютной температуре газа T_0 и давлении p_0 объем газа будет U_0 , а при другой температуре его T и другом давлении p объем газа будет U , то имеем на основании известных свойств газов:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{T}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p}.$$

Эта формула показывает, какая часть полного объема U_0 аэростата должна наполняться при изменении величин T_0 и p_0 на T и p .

Если бы температура газа и давление, под которым он находится, не изменялись, то было бы выгоднее всего наполнять аэростат газом до последней возможности—лишь бы оболочка не лопнула. Но давление газа и его температура могут изменяться от явлений метеорологических и искусственно, а затем также при поднятии.

Температура газа и воздуха одинакова

46. Рассмотрим влияние барометрического давления. Барометрические колебания возрастают от экватора земли к ее полюсам; но даже на широте 65° они не достигают 75 мм. Поэтому

$$\frac{p_0}{p} > \frac{720}{795} = 0,9057.$$

Следовательно, от этой причины, предполагая температуру постоянной, может наполняться только около $\frac{9}{10}$ объема аэростата.

47. Влияние температуры гораздо значительнее.

Наибольший замеченный на поверхности земли холод выражается -55°Ц ; наибольшая температура воздуха в тени $+47^{\circ}\text{Ц}$. Амплитуда более 100° . Отношение абсолютных крайних температур будет:

$$\frac{T}{T_0} = \frac{273 - 55}{273 + 47} = 0,680.$$

Значит, наполняться от этой причины может только около $\frac{2}{3}$ наибольшего объема газоместителя.

48. Приняв в расчет обе причины, найдем:

$$\frac{U}{U_0} = 0,618,$$

т. е. немного более $\frac{3}{5}$ всего объема.

49. Отсюда видно, что нельзя аэростат наполнить раз навсегда для всех перемен температур и давлений, потому что это будет чересчур невыгодно при высоких давлениях и низких температурах. Действительно, хотя подъемная сила все время остается неизменной, но надо, чтобы она была возможно большей. Из сказанного не следует, что относительное количество газа при наполнении должно составлять $\frac{3}{5}$. Это количество, конечно, зависит от температуры и давления при наполнении.

Если в формуле (45) введем вместо T_0 возможную высшую (большую) температуру $T_{\max}$, а вместо p_0 возможное низшее давление $p_{\min}$, то получим:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{T}{T_{\max}} \cdot \frac{p_{\min}}{p_0}.$$

Это уравнение показывает относительное наполнение аэростата при температуре T и давлении p .

50. Например, $T_{\max} = 47^{\circ}\text{Ц}$, $p_{\min} = 730$ мм; наполняем аэростат при 0°Ц и при 760 мм давления; тогда найдем:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{273}{47 + 273} \cdot \frac{730}{760} = 0,82,$$

или наполнять должно аэростат примерно на $\frac{4}{5}$ полного объема.

Равнодействующая постоянна

51. Мы не приняли тут в расчет нагревание аэростата солнечными лучами и охлаждение его путем лучейиспускания, вследствие чего температура его не равна температуре воздуха.

Но мы видели, что, регулируя температуру внутри аэростата, можно добиться постоянства равнодействующей (4), или (что то же) постоянства поднимающей силы (1).

Из формулы (1) найдем: $U = \frac{Q_{\Pi}}{\gamma_B}$, где поднимающая сила (Q_{Π}),

по условию, есть величина постоянная.

Значит, объем будет изменяться обратно пропорционально плотности окружающего оболочку воздуха.

52. Исключая из последней формулы γ_B посредством уравнения (7), получим:

$$U = \frac{Q_{II}}{\gamma_{B_0}} = \frac{p_0}{p_B} \cdot \frac{T_B}{T_0},$$

или зависимость объема от изменения температуры T_B и давления p_B воздуха.

В течение нескольких часов путешествия температура воздуха, в особенности же его давление (показание барометра), не может много измениться.

Итак, в случае регулирования температуры, только от этих мало изменяющихся условий зависит изменение объема аэростата, а не от нагревания его солнцем, затемнения облаками, охлаждения ночью и т. д.

53. Дифференцируя последнее уравнение относительно переменных T_B и p_B , получим:

$$dU = \frac{Q_{II}}{\gamma_{B_0}} \cdot \frac{p_0}{p_B} \cdot \frac{T_B}{T_0} \left(\frac{\partial T_B}{T_B} - \frac{\partial p_B}{p_B} \right).$$

54. С помощью уравнения (52) можем из этого уравнения исключить подъемную силу Q_{II} ; тогда получим:

$$\frac{dU}{U} = \frac{\partial T_B}{T_B} - \frac{\partial p_B}{p_B};$$

стало-быть, относительное изменение объема выражается относительным изменением температуры без (минус) относительного изменения давления; например, при 0°Ц (273°) увеличение температуры на 10°Ц вызывает относительное изменение объема на $10/273$, или около $1/27$. Уменьшение давления на 10 мм, при первоначальном давлении в 760 мм, вызовет еще увеличение объема на $1/76$.

Вертикальные перемещения аэростата как причина изменения его объема

55. Еще значительнее изменение объема газа от поднятия и опускания аэростата. Делать же это приходится в силу многих причин. Так, при перелете через горы, при остановках на высоких и низких местах земли, для достижения благоприятного воздушного течения и благоприятной температуры воздуха иногда выгодно, а иногда необходимо воздушному кораблю совершать вертикальные передвижения.

Определим зависимость между высотой H места над уровнем океана, его температурой, давлением и разрежением, или плотностью воздуха в этом месте.

56. Все знают, что температура воздуха убывает с возвышением места над уровнем моря. Но закон этого изменения тем-

пературы не открыт. Полагают, на основании наблюдений, что понижение температуры приблизительно пропорционально высоте поднятия и составляет около 5°Ц на 1 км восхождения *. Понижение температуры с возвышением места и обратно можно объяснить разными способами.

57. С точки зрения механической теории тепла молекулы газов, при движении вниз, ускоряют свое движение, вследствие чего температура газа повышается. При обратном движении от действия земной тяжести эта скорость уменьшается, что соответствует понижению температуры. Вычисления показывают, что степень понижения тепла будет пропорциональна повышению места и не зависит от амплитуды колебания газовых молекул, но величина этого понижения пропорциональна молекулярному весу газа **.

58. Так, для кислорода найдем около 10°Ц на 1 км поднятия, а для водорода (если бы атмосфера наша была водородная) в 16 раз меньше, т. е. менее 1° на 1 км.

Вычисления эти не вполне оправдываются, потому что солнце не нагревает равномерно верхние и нижние слои воздуха. Неравномерность температур поэтому еще должна возрасти. Кроме того, не оправдываются эти вычисления потому, что нижние слои воздуха и самая поверхность земли путем лучеиспускания стремятся непрерывно нагревать верхние, менее нагретые слои. Эфирные волны стремятся восстановить равновесие температур, нарушенное непрерывным действием тяжести на падающие и поднимающиеся молекулы воздуха.

Потому-то и не оправдывается теоретический закон понижения температуры пропорционально поднятию, а также и величина понижения в 10°Ц на 1 км поднятия.

Слои облаков, разная степень влажности воздуха и множество других факторов делают закон понижения капризным и неуловимым, как погода.

59. С этой же точки зрения можно объяснить и повышение температуры земли в связи с углублением. Молекулярный вес сложных земных пород гораздо больше, чем воздуха, и потому понижение должно быть гораздо значительнее. Возьмем в пример окись алюминия или глинозем Al_2O_3 . Вес молекулы равен 102. Вес же молекулы кислорода O_2 равен 32; следовательно, он раза в три меньше, а потому повышение температуры глинозема будет в три раза больше, чем в атмосфере, т. е. около 30° на 1 км, что и оправдывается почти точно, потому что теплопроводность раздробленных частиц почвы очень мала и потому нижние нагретые слои мало нагревают верхние.

60. Но вернемся к воздуху. Можно с другой точки зрения объяснить закон понижения температуры с поднятием.

* По международной стандартной атмосфере этот градиент полагают равным $\Delta t = 6,5^{\circ}\text{Ц}$ на 1000 м. Прим. ред.

** По этому поводу имеется отдельный труд автора „Второе начало термодинамики“. Прим. ред.

Понижение температуры зависит от поглощения воздухом тепла вследствие совершения им работы при поднятии и расширении. Воздух имеет не только горизонтальное движение, но и вертикальное, которое и должно сопровождаться сжатием или расширением, а следовательно, нагреванием или охлаждением его.

Если основываться только на этом и предполагать, что верхние слои не нагреваются вследствие лучеиспускания от теплых нижних слоев и от других причин, то можно теоретически прийти опять к прежнему закону и коэффициенту (10°Ц).

61. Определим прежде зависимость между разрежением газа и понижением от этого его температуры.

Имеем $\frac{U}{U_1} = \frac{\gamma_1}{\gamma}$, где одна и та же масса газа сначала имеет объем U_1 и плотность γ_1 , а потом объем U и плотность γ .

62. Далее, обозначив теплоемкость газа *при постоянном объеме* или его удельную теплоту через c_v , а механический эквивалент теплоты через A , получим на основании закона о сохранении энергии:

$$p \cdot dU = - U_1 \cdot \gamma_1 \cdot c_v \cdot \frac{1}{A} \cdot dT.$$

Тут p есть упругость газа или давление на единицу площади при его объеме U и абсолютной температуре T .

63. Но $p = p_1 \cdot \frac{T}{T_1} \cdot \frac{U_1}{U}$; тут p_1 соответствует U_1 и T_1 .

Следовательно:

$$\frac{p_1}{U} \cdot \frac{T}{T_1} \cdot dU = - \gamma_1 \cdot c_v \cdot \frac{1}{A} dT,$$

или, разделяя переменные, найдем:

$$64. \quad \frac{dU}{U} = - \frac{\gamma_1}{p_1} \cdot c_v \cdot \frac{1}{A} \cdot T_1 \cdot \frac{dT}{T}.$$

Положив $\frac{\gamma_1}{p_1} \cdot c_v \cdot \frac{1}{A} T_1 = \text{const}$, имеем:

$$65. \quad - \text{const} \cdot \frac{dT}{T} = \frac{dU}{U}.$$

Интегрируя это уравнение и определяя постоянное, вычислим:

$$66. \quad \text{const} \cdot \ln \left(\frac{T_1}{T} \right) = \ln \left(\frac{U}{U_1} \right);$$

из последней формулы получим:

$$67. \quad \frac{U}{U_1} = \left(\frac{T_1}{T} \right)^{\text{const}} \quad \text{и} \quad \frac{T}{T_1} = \left(\frac{U_1}{U} \right)^{\frac{1}{\text{const}}}.$$

68. Формулы (67) дают возможность узнать понижение температуры воздуха по данному его разрежению $\frac{U}{U_1}$, и обратно. Предполагая атмосферу состоящей из любого „постоянного“ газа, заметим, что величина const (64), по известным свойствам газов, остается постоянной. Действительно, при известном p_1 плотность газа γ_1 и удельная теплота c_v его зависят от природы газа, но тем не менее произведение $\gamma_1 \cdot c_v$ остается постоянным. Отсюда видно, что степень охлаждения при расширении постоянного газа не зависит от его природы; также и нагревание при сжатии.

69. Так как $\frac{U}{U_1} = \frac{p_1}{p} \cdot \frac{T}{T_1}$, то на основании (67) найдем:

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{p' \cdot T_1}{p_1 \cdot T} \right)^{\frac{1}{\text{const}}},$$

откуда

$$70. \quad \frac{T}{T_1} = \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{1}{1+\text{const}}}.$$

71. Теперь, вообразив вертикальный весомый столб воздуха, составим следующее дифференциальное уравнение, которое выражает, что приращение давления на столб пропорционально приращению его массы и силе тяжести g :

$$-dp = \gamma_1 \cdot \frac{p}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T} \cdot g \cdot dH.$$

Здесь dH есть дифференциал высоты H столба воздуха.

Тяжесть при 45° широты, согласно Лапласу, примем за единицу. При других широтах, согласно этому ученому, она будет: $g = 1 - 0,002552 \cdot \cos(2\varphi)$, где φ есть широта места*.

72. Вместо уравнения (71), на основании формулы (70), получим:

$$-p^{\frac{-\text{const}}{1+\text{const}}} \cdot dp = g \cdot \gamma_1 \cdot p_1^{\frac{-\text{const}}{1+\text{const}}} \cdot dH.$$

Интегрируя это уравнение и определяя постоянное, найдем:

$$73. \quad H = \frac{\text{const} + 1}{\gamma_1 \cdot g} \cdot p_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{1}{1+\text{const}}} \right].$$

$$74. \quad \text{Тут } \text{const} + 1 = 3,441 \text{ и } \frac{1}{1+\text{const}} = 0,2906.$$

* Мы тут не принимаем еще в расчет *уменьшение* силы тяжести с высотой. При поднятии на 5 км оно составляет около $\frac{1}{600}$. При больших высотах пренебрегать уменьшением силы тяжести нельзя. *Прим. автора.*

Высота атмосферы, соответствующая p_1 и γ_1 , принята равной нулю.

75. Из (73) получим:

$$\frac{p}{p_1} = \left[1 - \frac{H \cdot \gamma_1 \cdot g}{(\text{const} + 1) \cdot p_1} \right]^{1 + \text{const}}.$$

Отсюда и из (70), исключая отношение $\frac{p}{p_1}$, найдем:

$$76. \quad \frac{p}{p_1} = 1 - \frac{\gamma_1 \cdot g}{(\text{const} + 1) \cdot p_1} \cdot H.$$

Из этого уравнения с помощью формул (75), (63) и (61) вычислим:

$$77. \quad \frac{\gamma}{\gamma_1} = \frac{U_1}{U} = \frac{p \cdot T_1}{p_1 \cdot T} = \left[1 - \frac{\gamma_1 \cdot g \cdot H}{(\text{const} + 1) \cdot p_1} \right]^{\text{const}}.$$

78. Формулу (76) можно представить в виде:

$$T - T_1 = \frac{-\gamma_1 \cdot g \cdot T_1}{(\text{const} + 1) \cdot p_1} \cdot H.$$

Из этой формулы видно, что понижение температуры пропорционально высоте H , силе тяжести g и плотности газа γ . А так как плотность пропорциональна молекулярному весу и обратно пропорциональна теплоемкости c_p , то понижение температуры будет обратно пропорционально теплоемкости газа и пропорционально молекулярному его весу. Последнее мы уже высказывали вообще, даже в применении к горным породам.

Из уравнения (77) также видно, что степень разрежения $\frac{U_1}{U}$ атмосферы зависит не только от высоты места, но и от силы тяжести и природы газа γ .

79. Для H в 1000 м вычислим по уравнению (78) понижение температуры в $12,8^\circ \text{Ц}$.

Если предположить, что части атмосферы имеют быстрые вертикальные перемещения, причем нижние теплые слои, не нагревают путем лучеиспускания холодные верхние слои, а также и солнце и другие причины не имеют влияния на температуру воздуха, то термическое состояние его и степень разрежения в зависимости от высоты выразятся последними формулами.

Наоборот, если допустить, что температура воздуха постоянна, то легко получим формулу Лапласа, но неполную. Если же допустить на основании наблюдений, что понижение температуры пропорционально высоте, то в формуле этой можно сделать поправку, теоретически неточную, приняв, что высота H пропорциональна средней абсолютной температуре. Тогда-то и получим полную формулу Лапласа.

Хотя мы и вывели теоретически понижение температуры, на 1 км поднятия в 10° Ц, но это не согласуется с действительностью по причинам, уже выясненным.

Так, Коксвель во время своего воздушного путешествия нашел среднее понижение температуры в 4° Ц на 1 км. Био и Гей-Люссак нашли 6° Ц, Соссюр, при восхождении на Монблан, получил 7° Ц, а Гумбольд — только 5°.

Вообще опытные данные приблизительно подтверждают, что понижение температуры пропорционально высоте поднятия, но самая величина понижения оказывается раза в два меньше, чем нами вычислено. Выходит, что *понижение* температуры от вертикальных передвижений и *повышение* ее через лучеиспускание и другие причины — как бы две равные силы, дающие в compromise среднюю температуру в 5° Ц.

80. Поэтому примем в формуле (78) некоторый множитель η , меньший единицы и близкий к 0,5, и положим:

$$T - T_1 = \frac{-\eta \cdot \gamma_1 \cdot g \cdot T_1}{(\text{const} + 1) \cdot p_1} \cdot H,$$

или

81. $\frac{T}{T_1} = 1 - \Delta t_z \cdot H$, где Δt_z означает градиент температуры, так что

$$82. \quad \Delta t_z = \frac{\eta \cdot \gamma_1 \cdot g}{(\text{const} + 1) \cdot p_1}.$$

Очевидно, что Δt_z выражает *относительное* понижение температуры на единицу восхождения H .

Теперь составим дифференциальное уравнение подобно (71). Исключив в нем $\frac{T}{T_1}$ посредством (81) и разделив переменные, получим:

$$83. \quad \frac{dp}{p} = \frac{\gamma_1 \cdot g \cdot dH}{p_1 \cdot (1 - \Delta t_z \cdot H)}.$$

Интегрируя это уравнение, найдем:

$$84. \quad \ln \left(\frac{p}{p_1} \right) = \frac{\gamma_1 \cdot g}{p_1 \cdot \Delta t_z} \ln (1 - \Delta t_z \cdot H).$$

Отсюда, исключая Δt_z посредством уравнения (83), найдем:

$$85. \quad \frac{p}{p_1} = \left[1 - \frac{\eta \cdot \gamma_1 \cdot g}{(\text{const} + 1) \cdot p_1} \cdot H \right]^{\frac{\text{const} + 1}{\eta}};$$

затем по формулам (61), (63), (80) и последней вычислим:

$$86. \quad \frac{U_1}{U} = \frac{\gamma}{\gamma_1} = \frac{p}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T} = \left[1 - \frac{\eta \cdot \gamma_1 \cdot g}{(\text{const} + 1) \cdot p_1} \cdot H \right]^{\frac{\text{const} + 1}{\eta}} - 1.$$

87. Чтобы проверить наши формулы и чтобы показать еще, что формула Лапласа не обладает полной точностью, мы выведем ее из уравнения (85).

Определяя высоту, из него найдем:

$$H = \frac{(\text{const} + 1) \cdot p_1}{\gamma \cdot \gamma_1 \cdot g} \cdot \left[1 - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{\gamma}{\text{const} + 1}} \right],$$

или на основании (82)

$$H = \frac{1}{\Delta t_z} \cdot \left[1 - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{\gamma}{\text{const} + 1}} \right].$$

88. Если разложить в ряд показательную функцию в последней формуле, то получим:

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{\Delta t_z} \left\{ \frac{\gamma}{\text{const} + 1} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p} \right) + \frac{1}{1 \cdot 2} \cdot \left[\frac{\gamma}{\text{const} + 1} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p} \right) \right]^2 + \right. \\ &+ \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot \left[\frac{\gamma}{\text{const} + 1} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p} \right) \right]^3 + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} \cdot \left[\frac{\gamma}{\text{const} + 1} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p} \right) \right]^4 + \dots \left. \right\} = \\ &= \frac{\gamma}{\Delta t_z (\text{const} + 1)} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p} \right) \cdot \left\{ 1 + \frac{\Delta t_z}{2} \cdot \left\{ \left[\frac{\gamma}{\text{const} + 1} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p} \right) \right] + \right. \right. \\ &+ \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{\gamma}{\text{const} + 1} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p} \right) \right]^2 + \frac{1}{3 \cdot 4} \left[\frac{\gamma}{\text{const} + 1} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p} \right) \right]^3 + \dots \left. \right\} \left. \right\}. \end{aligned}$$

Выражение в прямых скобках при множителе $\frac{1}{\Delta t_z}$ приблизительно есть высота H . Поэтому напомним:

$$H = \frac{\gamma}{\Delta t_z (\text{const} + 1)} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p} \right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta t_z}{2} \cdot H \right),$$

или по (82)

$$H = \frac{p_1}{\gamma_1 \cdot g} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p} \right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta t_z}{2} \cdot H \right).$$

89. На основании (81) видно, что Δt_z выражает относительное понижение температуры на единицу поднятия, т. е. $\Delta t_z H = \frac{\Delta t}{T_1}$. Произведение $(\Delta t_z \cdot H)$ будет полным относительным понижением температуры при поднятии на высоту H . Следовательно, формулу можем написать так:

$$H = \frac{p_1}{\gamma_1 \cdot g} \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p} \right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta t}{2T_1} \right).$$

Здесь Δt есть разность температур двух мест, а T_1 — абсолютная температура нижнего места.

Сущность этой формулы почти такая же, как и лапласовской; из нее видно, что высота H обратно пропорциональна силе тяжести g и прямо пропорциональна средней абсолютной температуре воздушного столба. Но есть некоторая численная разница в определении высоты, что и понятно, так как только Реньо, значительно позднее Лапласа, дал довольно точные коэффициенты расширения газов, а следовательно, и возможность определения абсолютной температуры T^* .

90. Можно придать формуле (89) и совсем лапласовский вид. Действительно, из уравнения (82) найдем:

$$\Delta t_z \cdot H = \frac{T_1 - T}{T_1}.$$

Но так как $T_1 = 273 + t_1$ и $T = 273 + t$, где t и t_1 — обыкновенные температуры по Цельсию, то $\Delta t_z \cdot H = \frac{t_1 - t}{T_1}$ и

$$1 + \frac{\Delta t_z \cdot H}{2} = \frac{2T_1 - t_1 + t}{2T_1} = \frac{2 \cdot 273 + 2t_1 + t}{2T_1} = \frac{273}{T_1} + \frac{t_1 + t}{2 \cdot T_1}.$$

Теперь, вместо формулы (89), получим:

$$H = \frac{273 \cdot p_1}{T_1 \cdot \gamma_1 \cdot g \cdot \lg e} \cdot \left[1 + \frac{2(t_1 + t)}{4 \cdot 273} \right] \cdot \lg \left(\frac{p_1}{p} \right).$$

Тут $\lg e = 0,4343$, обратная же величина модуля равна 2,3026. Формула предыдущая изящнее этой, но мы ее вывели, чтобы лучше сравнить с лапласовской.

Заметим что $\frac{p_1}{\gamma_1} \cdot \frac{273}{T_1} = \frac{p_0}{\gamma_0}$, т. е. равно отношению давления воздуха при нулевой температуре к плотности воздуха при той же температуре; так что это есть величина постоянная для каждого газа.

Таким образом, полагая (для широты в 45°) $g = 1$, найдем высоту в m :

$$H = 18\,405 \left[1 + \frac{2(t_1 + t)}{1092} \right] \lg \left(\frac{p_1}{p} \right)^{**}.$$

* Гей-Люссак нашел для коэффициента расширения число 0,00375, что подтвердили Дюлонг и Пти. То же почти нашел Дальтон. Рудберг получил 0,00365 и почти столько же — Магнус. Реньо получил как последний около 0,00366. Последнее число (Реньо) мы и приняли. *Прим. автора.*

** В настоящее время в формуле Лапласа пользуются численным значением бинома температуры, указанным здесь. Так в книге „Основы метеорологии“ проф. З. М. Оболенского (стр. 100) имеем следующее выражение для формулы Лапласа (в принятых здесь обозначениях):

$$H = 18406,2 (1 + 0,00366 t_{cp}) \cdot \left(1 + 0,378 \frac{e}{p} \right) \cdot (1 + 0,0026 \cos 2\varphi) \lg \left(\frac{p_1}{p} \right).$$

$$\text{Заметим, что: } 0,00366 t_{cp} = \frac{2(t_1 + t)}{1092}.$$

Прим. ред.

Эта формула отличается от лапласовской только коэффициентом при $(t_1 + t)$, который у Лапласа равен 1000. Ошибка в высоте по формуле знаменитого астронома может быть значительна при большой сумме температур $(t_1 + t)$, что на практике не встречается. Повторим, что и с поправкой формула Лапласа не может считаться идеально точной [см. (87) и (88)].

Следует употреблять формулу (89) или (90), а еще лучше — формулу (87), которая имеет абсолютную точность для газовой атмосферы, если только понижение температуры строго пропорционально повышению места [вместо (87) можно взять и формулу (94)].

91. Мы не должны забывать, что наша цель — определить расширение объема аэростата при поднятии на высоту.

Для этого может служить формула (86). Так как в ней, согласно (89) и (82), $\frac{\gamma_1 \cdot \gamma_1 \cdot g}{(\text{const} + 1) \cdot p_1} \cdot H = \frac{\Delta t}{T_1}$, то из показателя формулы (87) можем исключить γ_1 ; тогда получим:

$$92. \quad \frac{U_1}{U} = \frac{\gamma}{\gamma_1} = \left(1 - \frac{\Delta t}{T_1} \right)^{\frac{T_1 \cdot \gamma_1 \cdot g}{\Delta t \cdot p_1} H - 1};$$

тут Δt есть разность температур двух мест в градусах Цельсия.

93. Также и вместо формулы (85) получим:

$$\frac{p}{p_1} = \left(1 - \frac{\Delta t}{T_1} \right)^{\frac{T_1 \cdot \gamma_1 \cdot g}{\Delta t \cdot p_1} \cdot H},$$

откуда

$$94. \quad H = \frac{\Delta t \cdot p_1}{T_1 \cdot \gamma_1 g} \cdot \frac{\lg_a \left(\frac{p_1}{p} \right)}{\lg_a \left(\frac{T_1}{T_1 - \Delta t} \right)}.$$

95. По формуле (92) или (86) можем составить таблицу наполнения аэростата газом для поднятия от уровня моря до какой-либо высоты.

Для этого положим: $\gamma = \frac{1}{2}$, т. е. температура понижается на 5°Ц на каждый км восхождения; $\gamma_1 = 0,001293$; $g = 1$ (для широты в 45° , см. (71); $p_1 = 103,33 \text{ кг}$ на 1 м^2 ; $\text{const} = 2,441$; $T_1 = 273^\circ$, т. е. 0°Ц .

Температуру определим по формуле (78) и переведем ее на градусы Цельсия.

Таблица 1

Высота в км	Темпера- тура по Цельсию в град.	Степень наполне- ния аэростата $\left(\frac{U_1}{U}\right)$	То же $\left(\frac{U_1}{U}\right)$, но при постоянной температуре, рав- ной 0° Ц
0	0	1,0000	1,0000
1	— 5	0,8960	0,8815
2	— 10	0,8000	0,7770
3	— 15	0,7145	0,6847
4	— 20	0,6359	0,6037
5	— 25	0,5636	0,5321
6	— 30	0,5002	0,4690
7	— 35	0,4419	0,4134
8	— 40	0,3894	0,3644
9	— 45	0,3422	0,3212
10	— 50	0,2998	0,2832
11	— 55	0,2619	0,2496

Приводим еще табл. 2* изменения плотности воздуха до вы-
соты 100 км.

Таблица 2

Тропосфера			Температура стратосферы — 75° Ц	
Высота в км	Температура по Цельсию в град.	Степень напол- нения аэростата $\left(\frac{U_1}{U}\right)$	Высота в км	Обратная вели- чина степени наполнения $\left(\frac{U}{U_1}\right)$
0	0	1,0000	16	7,25
1	— 5	0,9013	17	8,62
2	— 10	0,8120	18	10,21
3	— 15	0,7276	19	12,14
4	— 20	0,6519	20	14,41
5	— 25	0,5823	25	35,7
6	— 30	0,5192	30	80,6
7	— 35	0,4619	35	190,5
8	— 40	0,4101	40	450,4
9	— 45	0,3628	46	1 264
10	— 50	0,3203	50	2 519
11	— 55	0,2821	56	7 040
12	— 60	0,2476	60	13 720
13	— 65	0,2166	65	37 880
14	— 70	0,1890	70	78 740
15	— 75	0,1641	75	185 900
			80	439 000
			85	1 040 000
			90	2 487 000
			95	5 814 000
			100	13 720 000

* Табл. 2 и способ ее составления опубликованы автором в № 8—9 жур-
нала „Самолет“ за 1932 г.

Прим. ред.

97. Из табл. 1 видно*, что для поднятия, например, на высоту 6 км аэростат вниз, у уровня моря, мог наполнить газом только $1/2$ своего полного объема. Понижение температуры только для небольших высот пропорционально восхождению; далее же оно возрастает не так быстро и потому высота атмосферы гораздо больше, чем показывает наша формула. Вообще же ее можно применять настолько, насколько оправдывается принятый нами закон понижения температуры. До 10—20 км она должна давать результаты, близкие к истине.

98. Если допустить постоянную температуру, то, например, из уравнения (89) получим:

$$\frac{p}{p_1} = \frac{U_1}{U} = e^{-\frac{\gamma \cdot g}{p_1} \cdot H},$$

где e — основание неперовых логарифмов. Приняв те же условия, но постоянную температуру в 0°C , вычисляем степень наполнения аэростата (см. последний столбец табл. 1). Сравнивая два последних столбца, видим, что при постоянной температуре приходится меньше брать водорода, но разница даже при большой высоте невелика; так, при 10 км поднятия степень наполнения, при прогрессивном понижении температуры, составляет около 0,300, а при постоянной температуре — 0,283, т. е. почти то же. Далее можно заметить, что разница постепенно возрастает, достигает максимума при высоте в 6 км и затем уменьшается и при довольно значительной высоте обращается в нуль, так что при этой высоте наполнение $\left(\frac{U_1}{U}\right)$ одинаково — понижается температура в атмосфере или нет.

99. В случае небольших поднятий формулы (86), (87) или (92) можно упростить: *результаты получатся одинаковые.*

Так, из уравнения (86) имеем:

$$H = \frac{1}{\Delta t_z} \cdot \left[1 - \left(\frac{\gamma}{\gamma_1} \right)^{\frac{\eta}{\text{const} + 1 - \gamma}} \right].$$

Если разложить в ряд степенную функцию в этом уравнении, то получим:

$$H = \frac{1}{\Delta t_z} \cdot \left\{ \frac{\eta}{\text{const} + 1 - \gamma} \cdot \ln\left(\frac{\gamma_1}{\gamma}\right) + \frac{1}{1 \cdot 2} \left[\frac{\eta}{\text{const} + 1 - \gamma} \cdot \ln\left(\frac{\gamma_1}{\gamma}\right) \right]^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} \left[\frac{\eta}{\text{const} + 1 - \gamma} \cdot \ln\left(\frac{\gamma_1}{\gamma}\right) \right]^3 + \dots \right\}.$$

* Основное отличие численных значений этой таблицы от значения международной стандартной атмосферы заключается в том, что для стандартной атмосферы — температурный градиент (Δt_z) принят не 5, а $6^\circ,5\text{C}$.
Прим. ред.

Это — ряд, быстро сходящийся. Ограничиваясь поэтому одним членом в больших скобках, получим:

$$100. \quad H = \frac{\eta \cdot \ln \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} \right)}{(\text{const} + 1 - \eta) \cdot \Delta t_z}.$$

Упрощение может пойти еще дальше, если разложить и $\ln \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} \right)$; сделав это, получим:

$$101. \quad \ln \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} \right) = 2 \cdot \left[\frac{\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1}{\frac{\gamma_1}{\gamma} + 1} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1}{\frac{\gamma_1}{\gamma} + 1} \right)^3 + \dots \right].$$

Заметив, что и тут — ряд, быстро сходящийся, и ограничиваясь одним членом, в знаменателе которого приблизительно $\frac{\gamma_1}{\gamma} = 1$, найдем:

$$102. \quad \ln \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} \right) = \frac{\gamma_1}{\gamma} - 1.$$

Следовательно:

$$103. \quad H = \frac{2 \cdot \eta \cdot \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} - 1 \right)}{(\text{const} + 1 - \eta) \cdot \Delta t_z},$$

откуда

$$\frac{\gamma_1}{\gamma} = \frac{U}{U_1} = 1 + \frac{\text{const} + 1 - \eta}{\eta} \cdot \Delta t_z \cdot H.$$

На основании же (82), исключая Δt_z , получим:

$$104. \quad \frac{U}{U_1} = 1 - \frac{(\text{const} + 1 - \eta) \cdot \gamma_1 \cdot g}{(\text{const} + 1) \cdot p_1} \cdot H.$$

105. Полагая тут для уровня моря и нормальных условий:

$$\gamma_1 = 0,001293 \text{ кг/дм}^3, \quad c_s = 0,169 \text{ кал}, \quad g = 100 \text{ дм/сек}^2, \quad A = \frac{1}{4240} \text{ кал/кг дм},$$

$$T_1 = 273^\circ \text{ (или } 0^\circ \text{ Ц)}, \quad p_1 = 103,33 \text{ кг и } \eta = \frac{1}{2}, \text{ найдем } \text{const} = 2,441 \text{ и}$$

$$106. \quad \frac{U}{U_1} = 1 - 0,10748 \cdot H,$$

где H должна быть выражена в км.

* Механический эквивалент тепла принимают теперь равным $\frac{1}{4270} \text{ кал/кг дм}.$

Так, если $H = 1$ км, то степень наполнения $\left(\frac{U}{U_1}\right)$ будет равна 0,902; а по точной табл. 1 равна 0,896; ошибка составляет около $\frac{1}{150}$ определяемой величины. Понятно, что последняя формула не может быть применяема для поднятий выше 1 км, но она может быть приспособлена для плоскогорий всякой высоты, только постоянный множитель будет другой.

107. Более точна формула (100), из которой получаем:

$$\ln\left(\frac{\gamma_1}{\gamma}\right) = \ln\left(\frac{U}{U_1}\right) = \frac{(\text{const} + 1 - \eta) \cdot \Delta t_z}{\eta} \cdot H,$$

или на основании (82) и условий (105):

$$\ln\left(\frac{U}{U_1}\right) = \frac{(\text{const} + 1 - \eta) \cdot \gamma_1 \cdot g}{(\text{const} + 1) \cdot p_1} \cdot H = 0,1075 \cdot H;$$

$$\lg\left(\frac{U}{U_1}\right) = 0,046684 \cdot H.$$

Здесь выражен бриггов логарифм в зависимости от высоты в км.

108. Если, например, $H = 1$ км, то найдем $\left(\frac{U_1}{U}\right) = 0,898$, ошибка (табл. 1) уже будет гораздо менее, именно — около $\frac{1}{500}$ определяемой величины. Кроме того, последняя формула может быть применяема в гораздо более широких пределах. Так, полагая $H = 10$ км, найдем: $\frac{U_1}{U} = 0,3413$, тогда как по табл. 1 найдем около 0,3. Стало быть, и в этом случае ошибка не очень велика.

109. Кстати, соответственно формуле Бабинне*, можем дать упрощенную формулу высоты в зависимости от отношения $\left(\frac{p_1}{p}\right)$ барометрических высот, или давлений в двух крайних точках. Для этого возьмем формулу (89). В ней, разлагая логарифм в ряд, найдем:

$$\ln\left(\frac{p_1}{p}\right) = 2 \left[\frac{\frac{p_1}{p} - 1}{\frac{p_1}{p} + 1} + \frac{1}{3} \left(\frac{\frac{p_1}{p} - 1}{\frac{p_1}{p} + 1} \right)^3 + \dots \right].$$

* Из книги „Основы метеорологии“ проф. В. Н. Оболенского имеем следующее выражение для формулы Бабинне (в принятых здесь обозначениях):

$$H = 8000 \frac{2(p_1 - p)}{p_1 + p} \cdot (1 + \alpha t_{cp}).$$

Ограничиваясь одним членом при $\frac{p_1}{p}$, близком к единице, получим:

$$\ln\left(\frac{p_1}{p}\right) = 2\left(\frac{p_1 - p}{p_1 + p}\right).$$

Следовательно

$$H = \frac{2 \cdot p_1}{\gamma_1 \cdot g} \cdot \left(\frac{p_1 - p}{p_1 + p}\right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta t}{2T_1}\right).$$

Тут Δt есть разность температур двух мест — обыкновенно положительная.

110. Не забудем, что (для вычисления коэффициентов) $\frac{p_1}{\gamma_1} = \frac{p_0}{\gamma_0} \cdot \frac{T_1}{273}$, т. е. что $\frac{p_1}{\gamma_1}$ равно отношению давления (p_0) при нулевой температуре к плотности при той же температуре, умноженному на $\frac{T_1}{273}$, см. (90).

III. Из какого материала делать аэростат

111. Выведенные формулы и теоремы справедливы только в том случае, когда масса и состав заключенного в аэростате газа остаются неизменны, т. е. когда оболочка совершенно изолирует легкий газ от атмосферного воздуха. А это едва ли возможно при употреблении оболочки растительного или животного происхождения, так как все они и при отсутствии видимых отверстий пропускают газ. Это зависит не от разности давлений вне и внутри аэростата, а от самостоятельного, весьма быстрого и никогда не прекращающегося, движения газовых молекул, пробирающихся каким-то образом через все оболочки органического происхождения.

Так что аэростат не только теряет легкий газ, его наполняющий, но и приобретает более тяжелый воздух, представляющий собой смесь газов, как и внутренний легкий газ. Объем этого приобретения, по известным законам диффузии, раза в 3—4 (смотря по роду газов внутри аэростата) менее объема потери.

Таким образом одновременно совершаются два явления: уменьшение объема внутреннего газа и увеличение средней его плотности. Вследствие этого поднимающая сила аэростата уменьшается, а опускающая, т. е. тяжесть, увеличивается и аэростат или падает, или должен упасть.

Если бы еще было возможно без затруднений удалить воздух, всосавшийся в оболочку, и заменить его легким газом! Но и этого нельзя практически сделать, не выпустив весь газ.

Органическая оболочка способна гореть, что представляет также громадное неудобство, так как исключает на аэростате

возможность употребления огня и применения двигателей, требующих его. В самом деле, одна искра или струйка раскаленного газа либо воздуха может зажечь водород и тонкую оболочку аэростата и причинить моментальное падение и гибель экипажа.

Хорошо бы на построение аэростата употребить металлический материал. Кроме того что он не будет пропускать газ и безопасен от пожара, он имеет множество и других достоинств, как то: крепость, долговечность, *дешевизну*, негигроскопичность. Позволяя употребление огня, он даст возможность с помощью продуктов горения изменять температуру газа между известными пределами и способствовать тем вертикальной управляемости аэростата без потери газа и балласта.

112. Но помимо достоинств этот материал имеет и недостатки. Так, металл есть вещество тяжелое; может ли аэростат поднимать массивную металлическую броню? Не придется ли употреблять такое тонкое железо или другие металлы, которые невозможно фабриковать или которые в виде тонких листов будут рваться, мяться и быстро ржаветь? Наконец жесткость металла не есть ли неодолимое препятствие к употреблению этого рода материала?

Действительно, первые попытки устроить металлический шарообразный аэростат окончились полной неудачей *. Но вот Шварц сделал продолговатый управляемый аэростат из металла и летал на нем. Так-то оправдалось мнение VII воздухоплавательного отдела Императорского русского технического общества, которое гораздо ранее опыта Шварца, разбирая мой проект металлического управляемого аэростата, в 1890 г. высказало мысль, что с течением времени *аэростаты, вероятно, будут делать из металла*.

113. Вычислим радиусы шарообразных аэростатов, сделанных из металлических листов разной толщины и поднимающих только свою оболочку и газ.

Имеем:

$$\frac{4}{3} \pi \cdot l^3 (\gamma_B - \gamma_G) = 4\pi \cdot R^2 q_{OB},$$

где π есть отношение окружности к диаметру, l — радиус шара, q_{OB} есть вес единицы поверхности оболочки, а $(\gamma_B - \gamma_G)$ — разность плотностей воздуха и газа. Из уравнения найдем:

$$R = \frac{3q_{OB}}{\gamma_B - \gamma_G}.$$

Отсюда видно, что оболочка может быть произвольно массивна или толста, лишь бы радиус или размер шара был пропорционально велик.

* В 1831 г. Дюпюи-Делькур с Монжем установили из меди шарообразный аэростат. Попытка не увенчалась успехом (Moedebeck).

114. Если предположить, что аэростат наполняется водородом, то по формуле вычислим следующее.

Аэростат сделан из алюминия толщиной в 0,08 мм; 1 м² такой оболочки весит около 0,2 кг. Диаметр шара будет равен 1 м. Не думайте, что этот материал очень эфемерен: у меня есть визитная карточка такой же малой толщины и она кажется на-ощупь такой же твердой, как и обыкновенная, сделанная из тонкого картона. Можно употребить и медную фольгу с такими же результатами, но она на-ощупь гораздо слабее. Латунный лист толщиной 0,07 мм, т. е. почти такой же толщины, как и алюминиевый, требует диаметра в 2,8 м. Железо такой же толщины гораздо прочнее и несколько легче. Материал из железа или меди, вдвое более толстый, 1 м² которого весит около 1 кг (1,14 кг), требует диаметра в 5,7 м. Жесть, из которой делают крышки для коробочек с ваксой и пр., даст вам понятие о материале этого сорта. Если употребить материал еще вдвое массивнее, о котором дает понятие обыкновенная жесть, употребляемая на дешевые жестяные лампы, формы для мороженого и пр., то диаметр поднимающегося в воздух шара будет еще вдвое больше, именно около — 11,4 м.

115. Всего труднее сделать шарообразный металлический аэростат, поэтому я совсем не имею в виду эту форму для постройки: моя цель только указать на размеры шаров в зависимости от массивности оболочек и на степень практичности их.

Аэростаты, устроенные из тех же материалов, но вдвое больших линейных размеров, кроме того что поднимутся сами, но еще и поднимут груз, равный весу оболочки.

116. Борьба с метеорологическими влияниями требует обязательного подогревания внутреннего газа. Только регулируя его температуру, можно добиться вертикальной управляемости без потери газа и балласта. Никакие другие средства не могут уравновесить могущественное нагревание аэростата солнечными лучами* (см. К. Циолковский, „Простое учение о воздушном корабле“). А раз будет употреблен огонь, необходимы сгораемые или по крайней мере безопасные от огня оболочки.

117. Относительно же того, как примириться с жесткостью металлического материала, у нас будет речь впереди, ибо это — вопрос весьма сложный.

IV. Некоторые условия, которым должен удовлетворять управляемый аэростат

118. Металлический материал не есть необходимое условие управляемости, но он есть необходимое условие практичности, безопасности, дешевизны, распространенности и грандиозности воздушных кораблей. Этот материал, пожалуй, можно считать

* Кстати заметим, что Медебек совершенно согласен с тем, что подогревание есть лучший способ для достижения вертикальной управляемости, если бы не опасность от огня для сгораемых оболочек.

необходимым условием *вертикальной* управляемости. Другие условия, которым должен удовлетворять аэростат, следующие.

а) Он должен иметь в горизонтальном направлении удлиненную и заостренную с обоих концов форму, дабы представлять ничтожное сопротивление ветру при стоянках „на якоре“ и при самостоятельном движении в воздухе. В этом отношении аэростат должен напоминать рыбу, птицу или крейсер*.

б) Но не только оболочка, но и другие части аэростата должны по возможности удовлетворять тому же условию.

в) Объем аэростата или газоместности должен иметь возможность изменяться *без нарушения плавности формы и образования складок*, могущих увеличить сопротивление аэростата ветру и дать трещины. Изменение объема необходимо для того, чтобы легкий газ мог свободно расширяться и сжиматься под влиянием меняющихся температур и давлений, например, при подъятии в высоту.

г) Аэростат должен быть достаточно прочным, т. е. оказывать достаточное сопротивление давлению газов, силе тяжести, действию ветра и пр., чего достигают, давая частям аэростата некоторую массивность и строя их из лучших материалов.

д) Аэростат должен иметь устойчивое равновесие при горизонтальном положении; иначе — устойчивое направление продольной оси аэростата. Эта горизонтальность оси не должна нарушаться при изменении работы двигателей или даже при полной их остановке и пускании в ход. Она также не должна нарушаться и при передвижениях людей внутри ладьи или при неправильных — негоризонтальных, непрямолинейных и неравномерных — движениях воздуха, окружающего аэростат.

е) Он должен подниматься и опускаться, не теряя газа и балласта.

ж) Он должен иметь возможность изменять величину своей подъемной силы при увеличении или уменьшении грузов или пассажиров, а также и для успешной борьбы с метеорологическими влияниями, главным образом, — для борьбы с изменением подъемной силы аэростата от действия солнечных лучей.

з) Уничтожение горючего материала, составляющего источник самостоятельного движения аэростата, не должно нарушать высоту аэростата над уровнем моря.

и) Скорость самостоятельного горизонтального движения аэростата не должна быть незначительна по отношению к скорости ветра. Короче — она должна быть не меньше скорости сильного ветра.

Задавшись такими требованиями, опишем устройство газового воздушного корабля, удовлетворяющего этим требованиям, что будет далее доказано путем вычислений. Затем мы займемся

* В настоящее время носовая часть у воздушных кораблей обычно делается закругленной.

способом построения аэростата, управления им и некоторыми другими вопросами.

V. Краткое описание металлического воздушного корабля *

119. Черт. 1 справа изображает проекцию частей аэростата на вертикальную плоскость, проходящую через продольную ось аэростата. Иначе — это продольный его разрез.

Слева дан поперечный разрез или проекция на поперечную вертикальную плоскость.

По общему виду наш металлический воздушный корабль напоминает обыкновенный управляемый аэростат. Та же приблизительно форма оболочки, тот же гребной винт, тот же руль, те же ладья и двигатель.

120. Понять возможность устройства металлического продолговатого мешка, изменяющего свой объем и даже складывающегося в плоскость без вреда для своей целости и без общего нарушения плавной формы, можно даже гораздо легче, чем я показывал это в предыдущих моих трудах („Аэростат металлический, управляемый“ и „Простое учение о воздушном корабле“).

121. Соедините две прямоугольные полоски картона так, чтобы получилась фигура продольного сечения аэростата (черт. 1). Затем одну или обе стороны этого продолговатого цилиндра заклейте толстой бумагой; получите что-то вроде продолговатого барабана или решета (черт. 2).

Эта коробка и изображает аэростат, объем которого, однако, не может изменяться.

122. Но мы можем разрезать острым ножом боковые плоские стенки этого мешка на параллельные полоски, перпендикулярные продольной оси мешка (черт. 2).

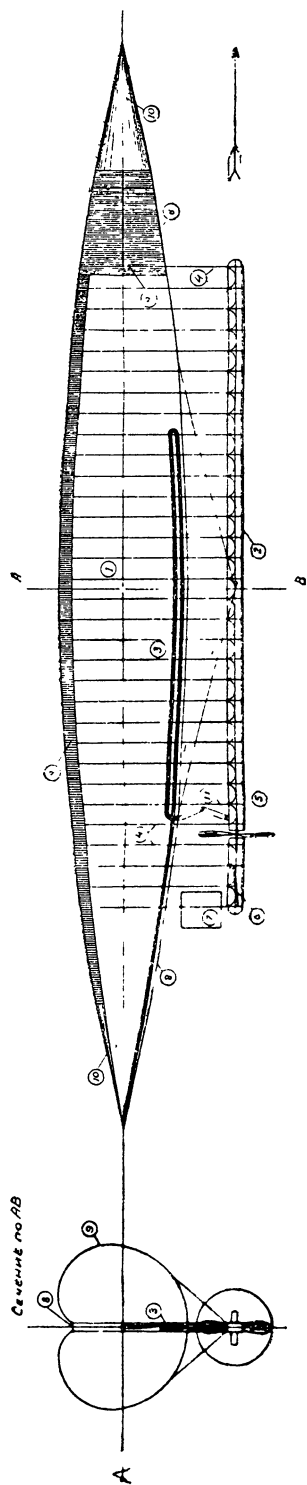
Теперь, надавливая на прямоугольные картонные полоски, сближая и удаляя их, мы увидим, что объем и форма нашего мешка могут весьма сильно изменяться без образования каких-либо складок; но горе в том, что между полосками образуются продольные щелчки, тем более узкие, чем продолговатее наш мешок и чем тоньше самые полоски (черт. 3).

123. Этому горю можно помочь, если полоски заранее сделать из волнистого материала, например из гофрированной бумаги, гребни которой идут вдоль полосок; черт. 4 изображает одну такую полоску.

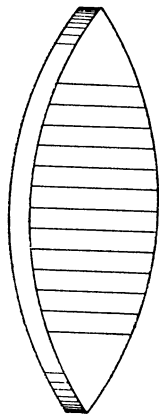
Сделав наш мешок из таких полосок, но уже соединенных в одно целое (черт. 5), получим бумажный или металлический

* Предлагаемое описание имеет целью дать представление о металлическом аэростате, чтобы читатель знал, о чем далее идет речь; но описанное не составляет чего-либо полного, непреложного, идеального. Напротив, как увидим далее, возможны и полезны значительные отклонения от описанного устройства воздушного корабля. Разбору этих отклонений мы посвятим особую главу.

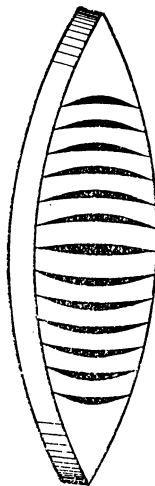
Прим. автора.



Черт. 1.



Черт. 2.



Черт. 3.



Черт. 4.



Черт. 5.

непроницаемый и закрытый со всех сторон резервуар (газгольдер), могущий, при известных условиях, определяемых математическим анализом, в связи с данными о свойствах материалов, изменять свою форму и объем в широких пределах и даже складываться в плоскость без малейшего вреда для своей целостности и без образования неправильных складок (складываются в плоскость, конечно, только боковые стенки).

124. Таким-то или подобным образом устроена и металлическая оболочка нашего газового корабля. Она устроена из волнистой жести, гребни которой идут по окружностям поперечных сечений аэростата (черт. 1).

125. Но кроме этой тонкой волнистой поверхности оболочка снабжена и массивными частями: двумя парами продольных брусьев, идущих сверху и снизу оболочки, из конца в конец ее и множеством поперечных округлых полос, напоминающих обручи у бочки и соединяющих продольные брусья (черт. 1). Понятие об оболочке и массивных частях ее дает также черт. 5. Боковые концы оболочки, хотя и еще больше снабжены массивными частями, составлены из *гладких*, конических поверхностей*.

126. Черт. 1 показывает, как держится ладья, или помещение для пассажиров, грузов, машин и пр. Она висит на двух рядах отвесных цепей, которые привешены к паре верхних продольных массивных брусьев. Через нижние же брусья цепи свободно проходят. Благодаря этому верхняя часть оболочки вдавлена по всей длине. Благодаря этому же газ внутри аэростата находится постоянно в некотором небольшом напряжении. Если он расширится — оболочка разворачивается, ладья подымается и часть цепей входит через муфты с набивкой, не пропускающей газ, внутрь аэростата; если сожмется — оболочка свертывается, объем газоместности уменьшается и часть цепей выходит наружу**.

127. При таком прикреплении цепей аэростат как бы всегда полон (округлен) и продольная ось его будет достаточно устойчива. Но при этом необходимо, чтобы цепи каким-нибудь образом скреплялись с парой нижних массивных полос. Только тогда, при случайном наклонении аэростата, равновесие его продольной оси будет устойчиво или, точнее, ее горизонтальность будет устойчива. Когда газу будет тесно, например при поднятии корабля, или когда он сожмется, например при опускании, то цепи надо разъединять с нижними полосами, чтобы оболочка приняла нормальную форму (черт. 1).

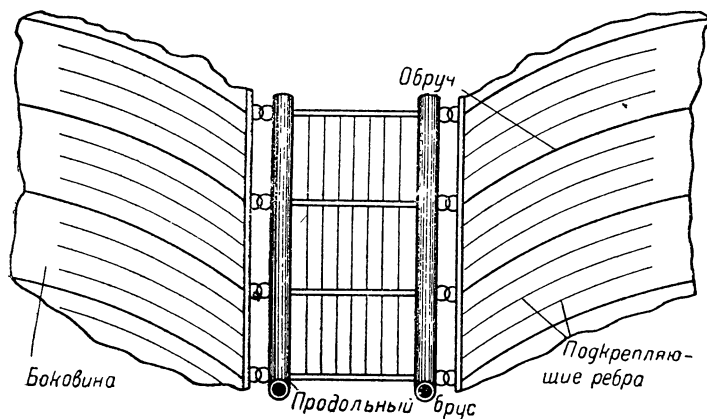
128. Цепи в средней части аэростата *никогда не соединяются с нижними брусьями* и это весьма важно, так как дает возможность газу несколько расширяться и сжиматься без изоляции прочих цепей.

* Опыт постройки моделей привел автора к отказу от гладких конических концов, так как волнистая поверхность оказалась более устойчивой.

** Ниже автором предложен другой способ крепления ладьи, не меняющий, однако, силовой схемы, здесь указанной.

Прим. ред.

129. Черт. 6 показывает, как соединяются верхние продольные массивные брусья с обручами и оболочкой; соединение это подвижное; оболочка может свободно, почти без трения, поворачиваться вокруг бруса. Подобное же соединение устроено и внизу. Но соединение это не может быть герметическим; через него будет утекать газ. Поэтому оно закрывается толстой, мягкой и непроницаемой полосой, идущей из конца в конец оболочки.

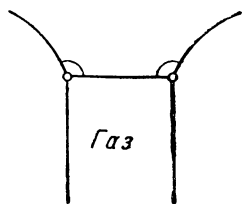


Черт. 6.

Таких полос будет четыре, по числу продольных брусков. Черт. 7 изображает это приспособление в поперечном разрезе.

130. Понятие об устройстве ладьи дают черт. 1 и 8.

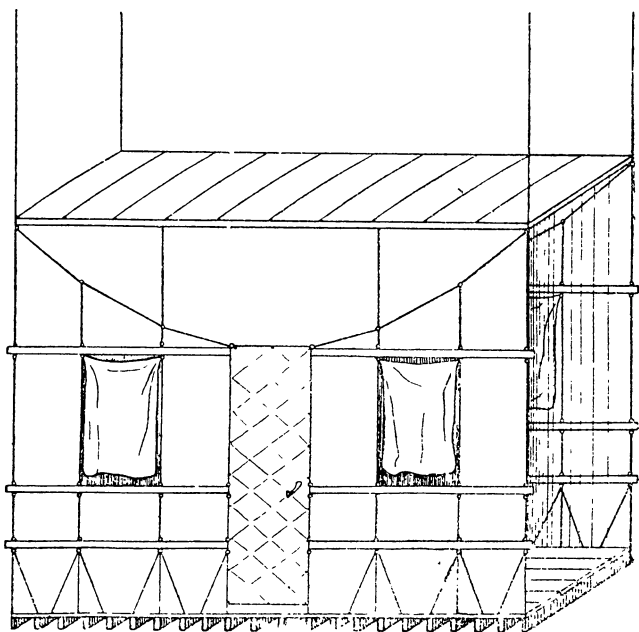
131. Верхняя часть цепей, не выходящая из оболочки, может состоять из одного или немногих звеньев; также и наружная часть цепей, никогда не входящая внутрь оболочки. Промежуточная же их часть, скользящая через нижние брусья, составлена из многих звеньев. Устройство этой части цепей видно из черт. 9. Такая цепь может изгибаться во все стороны, как веревка. Между каждым двумя сравнительно длинными звеньями находится короткое звено, сделанное из крепчайшего материала. Эти-то короткие звенья и имеют углубления, в которые входят особые стерженьки, с помощью которых звенья сцепляются в одно целое с оболочкой, кроме средней ее части, где цепи всегда свободны. Из этого устройства видно, что при качании ладьи и цепей не может быть перелома последних. Свободные же цепи могут быть заменены проволочными канатами или обыкновенными цепями с особым приспособлением для изолирования газов.



Черт. 7.

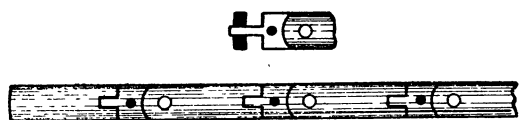
132. Черная труба внутри оболочки (черт. 1) назначена для нагревания легкого газа внутри аэростата и для изменения его подъемной силы в широких пределах. Повышение температуры

газа и оболочки не только увеличивает подъемную силу аэростата, но и особенно полезно, пожалуй, — необходимо для стран умеренных и холодных, где выпадает снег. На теплой оболочке он тает и стекает, не утяжеляя аэростата и не портя оболочки



Черт. 8.

в случае обледенения снега от действия, например, солнечных лучей или теплого ветра. При холодной же оболочке на одной ее части снег может накапливаться в большем количестве и го-



Черт. 9.

ризон-
тальность
продоль-
ной оси от этого может
нарушиться; удалять же
снег механическим путем
не так легко.

133. Нагревается чер-
ная труба продуктами
горения в моторах воз-
душного корабля. Эти

продукты из двигателей выходят в особый регулятор темпера-
туры (черт. 1 и 10). Тут они встречаются два отверстия, отчасти
закрытые заслонкой, передвигаемой рукой (или-автоматически),
так что одна часть горячих газов устремляется через трубу
наружу и уносится встречным воздушным потоком, не дымя
пассажирам, находящимся в передней части ладьи, а другая
направляется вертикально, через посредство особого проводника,.

в черную трубу, внутрь оболочки, откуда выходит наружу в кормовой части оболочки, не загрязняя ее.

Расстояние между оболочкой и ладьей изменяется и потому наружная труба должна быть так или иначе приспособлена к этому.

134. Обыкновенно оба отверстия открыты наполовину и легкий газ нагрет до средней величины. Но, передвигая заслонку, можно температуру его увеличивать и уменьшать. Таким-то образом можно управлять подъемной силой аэростата, а следовательно, и вертикальными его передвижениями.

135. Когда аэростат не имеет поступательного движения, то горизонтальность продольной оси достигается помощью весьма незначительного передвижения ладьи относительно оболочки. Это передвижение совершается с помощью наклонных тяжей, видных на черт. 1; оно сопровождается отклонением цепей на самый незначительный угол (не более $5 - 10^\circ$).

Когда же аэростат имеет быстрое горизонтальное движение, то кроме этого средства у нас будет еще другое, не менее могущественное: это — горизонтальный руль, действующий наподобие птичьего хвоста. Он может по желанию и автоматически поворачиваться маленьким двигателем.

136. В средней нижней части оболочки должны помещаться приборы, указывающие на разность давлений вне и внутри аэростата (манометр). Когда это давление ненормально велико, то манометр заставляет звонить прибор. То же будет, когда оно чересчур мало и потому грозит нарушением горизонтальности продольной оси; только звонок этот будет другого тона. Наконец, когда это давление опасно для целостности оболочки, сам собою открывается в кормовой части оболочки предохранительный клапан, выпускающий легкий газ и предупреждающий катастрофу.

137. Кругом оболочки, вдоль ее четырех массивных продольных брусев, устроена не видная на чертежах галлерей, делающая доступными важнейшие части оболочки. Прибавим, что черт. 1, по масштабу $1/500$, изображает металлический воздушный корабль на 200 человек, длиной в большой океанский пароход.

VI. Форма управляемого аэростата

Форма оболочки

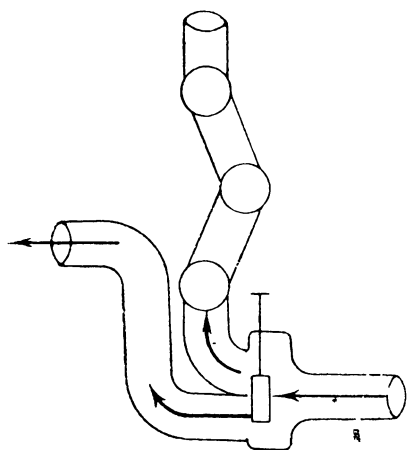
138. Опора тяжей, держащих ладью, обыкновенно не находится в верхней части оболочки, как у нас (черт. 1) **.

Лучшего ничего я придумать не могу. Представим себе, например, что цепи прикреплены к боковым частям аэростата,

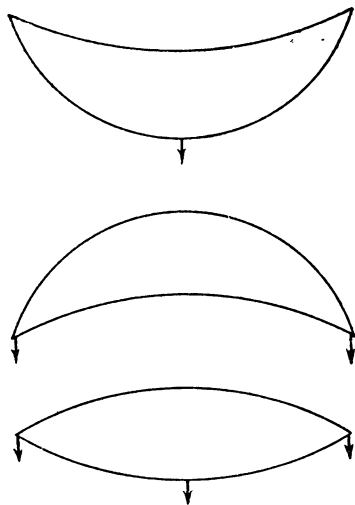
* В дальнейшем автор отказался от продольного перемещения ладьи и для регулировки статического момента предложил неравномерное стягивание оболочки (см. ниже). *Прим. ред.*

** В настоящее время внутренняя подвеска стала широко применяться в мягких и полужестких воздушных кораблях. *Прим. ред.*

как мы видим почти у всех мягких аэростатов. Но, во-первых, от этого цепи будут чересчур длинны и потому представят излишнее сопротивление движению воздушного корабля. Во-вторых, хорошо надутый аэростат не будет в состоянии увеличивать свой объем, а потому, при увеличении его, может лопнуть или потерять часть газа. Если же он неполон, то горизонтальность длинной оси оболочки не будет устойчива: аэростат будет „клевать“ то носом, то кормой. Чтобы уничтожить это „клевание“, пришлось бы внутри оболочки иметь баллонет, более или менее раздутый воздухом. Баллонет должен быть громаден,



Черт. 10.



Черт. 11.

чтобы удовлетворить практическим требованиям относительно расширения газа; затем баллонет имеет массу недостатков, говорить о которых было бы слишком долго; а в применении к металлическому аэростату он прямо невозможен, так как уничтожит достоинство металлического материала. Действительно, баллонет можно делать только из органического материала, подверженного диффузии. Таким образом, некоторое время спустя, водород смешается с воздухом баллонета и мы будем иметь в аэростате заряженную бомбу, могущую каждую секунду при взрыве разнести металлическую оболочку; кроме того, мы дадим тогда возможность проникать воздуху в аэростат. Для чего же тогда и металлическая оболочка!?

139. По тем же причинам (затруднено изменение объема) нельзя привешивать цепи и к нижней продольной полосе оболочки, или к нижним продольным брусам. Есть и другие причины, мешающие иному прилаживанию ладьи, чем нами принято.

Что же касается качаний ладьи при этом способе прикрепления цепей, то они могут быть устранены диагональными поперечными и продольными (черт. 1) таями (непостоянной длины).

140. Предположим, что оболочка мягкая и имеет приблизительно форму какой-либо рыбы. Вдуем в эту оболочку некоторое количество легкого газа и поместим ее в воздух. Форма легкого газа или оболочки будет зависеть от многих причин, например:

а) От степени наполнения оболочки газом или от его давления.

б) От геометрических свойств самой мягкой поверхности. Так, сильно надутая оболочка может принять форму тел вращения самых разнообразных фасонов. Возможны и неправильные формы, бесконечно разнообразные.

в) От распределения массы оболочки на ее поверхности, т. е. оболочка может не иметь постоянной толщины и это обстоятельство имеет влияние на ее форму, — в особенности, когда она мало раздута.

г) От полного веса оболочки по отношению к ее подъемной силе.

д) От сравнительной величины груза.

е) От распределения его и способа прикрепления.

Так, в зависимости от распределения груза, мягкая оболочка может принять три главных вида, что ясно из черт. 11, так же как и причины этого.

141. Сузим нашу задачу и вернемся к металлическому аэростату известного устройства.

В сложенном виде он имеет вид удлиненной цилиндрической коробки (черт. 2 и 5) с плоскими и тоже удлиненными боками.

Эти бока составляют две равные плоскости, почти совпадающие, потому что высота цилиндра, или расстояние между этими плоскостями, сравнительно, ничтожно. Когда аэростат раздувается газом, он принимает тот или другой вид (черт. 1). Средняя часть его остается приблизительно цилиндрической, но бока принимают форму более или менее округлую.

142. Понятие о форме оболочки дают среднее продольное сечение (черт. 1) и поперечные сечения (черт. 1, 13, 14, 15 и 16).

Среднее продольное сечение изменяется, но оно, очевидно, зависит от нас, т. е. от геометрических свойств плоских боков цилиндра (черт. 2 и 5). Плавная кривая, его ограничивающая, может быть выражена тем или другим уравнением, по нашему желанию, т. е. по конструкции аэростата.

Поперечному же сечению оболочки мы не можем придать любую форму, хотя, теоретически, она зависит от распределения массы оболочки в ее различных частях, от способа подвешивания ладьи и от степени продольного натяжения гофрированной поверхности аэростата.

Форма поперечного сечения цилиндрического аэростата*

Я употреблял вообще два способа для предсказания и выяснения явлений, касающихся воздухоплавания.

143. Первый из них — чисто аналитический; но для определения формы воздушного корабля он оказывался или очень сложным, или почти бессильным, потому что решал только частные случаи.

1. Гидростатическая модель

144. Второй — опытный, с примесью несложного анализа. Так, например, если сделать из мягкой, но непроницаемой и мало растяжимой материи небольшой мешок, имеющий форму аэростата, и погрузить его в воду, то этот расположенный подобно аэростату и содержащий воздух мешок, с прицепленным к нему так или иначе грузом, примет ту самую форму и представит вообще те самые явления, которые свойственны аэростату, содержащему легкий газ и погруженному в воздух.

145. Таким образом, употребляя чистую водяную ванну, ограниченную плоскими стеклянными стенками, можно видеть (и определить) форму аэростата и решить некоторые вопросы относительно устойчивого, горизонтального направления в его продольной оси.

146. Для желающих производить такие опыты дам совет: для опытов может быть употреблен бычий пузырь или больших размеров, хотя бы и очень неправильный резиновый мешок с отверстиями, затыкаемыми пробкой; но как то, так и другое необходимо заключить в хорошо выкроенный и аккуратно сшитый холстинный или ситцевый мешок, имеющий ту или другую форму. К этому мешку уже прилегает внутри его более или менее неправильными складками непроницаемый резиновый мешок. А к ситцевому мешку удобно крепить так или иначе груз. К нему также, для увеличения его относительного веса без изменения гибкости частей, можно прикреплять и броню в виде свинцовых плиток, чуть пришитых к ситцу, но не связанных между собою.

2. Вереvoчный многоугольник

147. Этот „водяной метод“ особенно ценен в применении к решению вопроса об устойчивом направлении продольной горизонтальной оси аэростата; применительно же к определению формы поперечных сечений прием этот не так удобен, и я пу-
скал в ход другой, но тоже эмпирический, способ. Вот он.

* Уравнения этой главы применимы к мягкой оболочке не менее, чем к металлической, и потому ни в каком случае не представляют узкого интереса.

Прим. автора.

Описание опытного исследования поперечного сечения заимствовано из книги Циолковского, Аэростат металлический, управляемый, вып. 2. Калуга 1893.

Прим. ред.

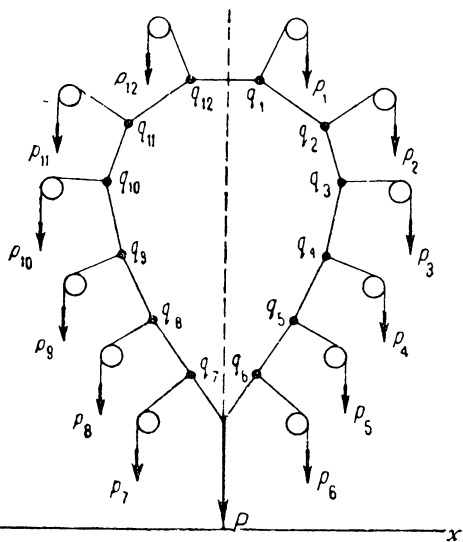
Я взял нитку длиною в 88 см и по всей длине ее, на равных расстояниях друг от друга, прикрепил 12 равных грузов ($q_1, q_2, q_3, \dots, q_{12}$) (черт. 12). Эта нитка с грузами или без грузов должна изображать у меня весомую или невесомую оболочку аэростата, вернее — часть этой оболочки — полосу, заключенную между двумя плоскостями, нормальными к продольной оси аэростата.

Концы нитки я связал и положил ее в округлом виде на горизонтальную деревянную доску. Затем к каждому из 12 грузов ($q_1, q_2, q_3, \dots, q_{12}$) я прикрепил тонкие нити, к свободным концам которых привешивались бумажные мешочки ($p_1, p_2, p_3, \dots, p_{12}$), наполненные песком в различной степени, именно так, чтобы вес каждого груза, считая и вес мешочка, был пропорционален расстоянию y точки прикрепления ($q_1, q_2, q_3, \dots, q_{12}$) тонкой нити до оси xx .

Тяжесть нагруженных мешочков должна заменять давление газа внутри аэростата, которое всегда нормально к элементу его поверхности; поэтому мешечные нити перекидывались x через легкие колеса ($k_1, k_2, k_3, \dots, k_{12}$) с желобком по окружности и с дыркой в центре для укрепления на доске посредством булавок. С помощью этих блоков, перемещая булавки, на которых они свободно вращаются, стараются мешечные нити расположить так, чтобы они делили пополам углы нитяного многоугольника, т. е. чтобы соблюдалась перпендикулярность к плавной кривой, проведенной через вершины этого многоугольника.

На самом деле, располагать нормально давление надо бы не к элементам кривой, а к элементам поверхности аэростата; но, ввиду его значительной продолговатости и некоторой симметрии сечения, это почти одно и то же.

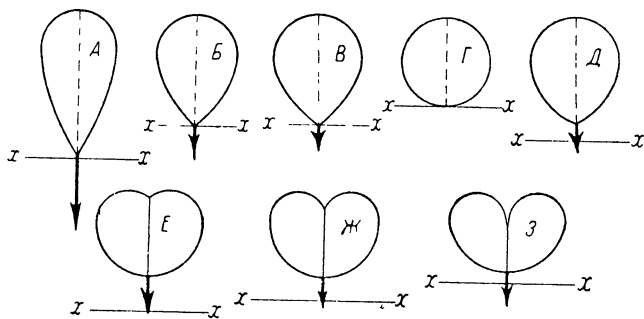
148. Ту точку, где нити соединяются к концу главной нити, пригвоздим к доске неподвижно или привешиваем к ней такой груз P (изображающий вес части ладьи, соответствующей ширине рассматриваемого сечения), который бы делал эту точку неподвижной. Теперь придаем доске вертикальное положение, соблюдая, однако, горизонтальность оси xx ; от этого главная нить (оболочка), имевшая форму окружности, удлинится кверху, а в нижней точке образуется угол тупой или острый, смотря



Черт. 12.

по обстоятельствам. При этом нарушаются: 1) нормальность мешечных нитей к элементам оболочки и 2) пропорциональность мешечных масс к высотам y , или расстояниям грузов оболочки ($q_1, q_2, q_3, \dots, q_{12}$) до оси xx . Это изменение нужно уничтожить перемещением блоков и изменением мешечных грузов. Произойдет новое незначительное уклонение, которое исправляется таким же образом, и т. д. На практике это оказывается довольно легким.

Под нить, изображающую поперечную полосу оболочки аэростата, я подкладывал лист белой писчей бумаги, на которую снимал копию поперечного сечения. Потом вырезывал этот лист ножницами, округляя углы, зависящие от прерывности грузов оболочки, — и исследовал.



Черт. 13.

149. Ось xx в разных опытах была на различных расстояниях от низшей точки сечения, а в первых опытах проходила через эту точку, т. е. разность давления в низшей точке предполагалась равной нулю. Отношение веса оболочки к весу груза (или нагруженной лодки) также в различных опытах менялось.

В других опытах (черт. 13, Е, Ж и З) груз висел на цепи, верхний конец которой прикреплялся не к низшей, а к диаметрально противоположной высшей, но не самой высшей, точке оболочки; нижняя же часть цепи, пройдя через внутренность аэростата, свободно скользила через нижнюю часть сечения.

На подмогу к этим опытам были очень несложные вычисления и соображения. Итак, — вот главные основания, которые послужили мне к дальнейшему рассмотрению формы поперечного сечения корабля. Более совершенное изучение аэростата и его движения произойдет не только путем усиленного умозрения, но и путем непосредственного исследования аэростата, выстроенного по первым несовершенным опытам и теориям, и сверки предыдущих выводов с новыми результатами.

150. Когда груз прикреплен к низшей точке сечения и когда ось xx проходит через эту самую точку, т. е. когда разность давлений в низшей точке равна нулю, то форма сечения тем ближе

к кругу, чем менее вес груза по отношению к весу оболочки (черт. 13 *A*, *B* и *B*); так что при нулевом грузе сечение обращается в круг (черт. 13 *Г*); то же самое подтверждает и теория; но при невесомой оболочке, или когда груз в сравнении с ее весом бесконечно велик, сечение не сжимается в две параллельные нитки, а имеет значительную ширину (черт. 13, *A*).

151. Когда ось *xx* находится под низшей точкой сечения, т. е. когда разность давлений в низшей точке более нуля, но способ прикрепления груза тот же, то сечение тем ближе к окружности, чем линия *xx* ниже, т. е. чем разность давления больше (черт. 13, *Д*). В этом опыте оболочка была невесомая, т. е. к главной нитке 12 грузов не прикреплялось; давление же в низшей точке выражалось газовым столбом $b = \frac{2}{3} D$. (черт. 12) *.

А в первых четырех опытах давление $b = 0$; но отношение груза к весу оболочки последовательно изменялось так: 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ и 0, т. е. в первом случае вес груза был равен весу оболочки, во втором он составлял половину веса оболочки и т. д.

152. Понятно, когда относительное уменьшение груза будет идти попутно с постоянным увеличением давлений в низшей точке сечения, то последнее еще скорее будет приближаться к форме круга.

Этот, а также и обыкновенный способ прикрепления груза посредством бечевки, идущих от боковых частей оболочки (Креб и Ренар, Дюпюи де-Лом), имеет то неудобство, что при сравнительно ничтожном уменьшении площади сечения или объема аэростата поперечное сечение весьма суживается в горизонтальном направлении, удлиняясь почти настолько же в ответном, отчего и площадь почти не изменяется; волны же оболочки сильно сокращаются, а самая оболочка очень изгибается, — и вообще, изменение объема весьма непропорционально изгибу оболочки и сокращению волн.

Говорю это после многих соображений и неприводимых здесь вычислений. Есть еще и другие невыгоды; например, когда в аэростате мало газа, то направление продольной оси очень неустойчиво, потому что давление в низшей точке будет гораздо менее нуля, и аэростат, при наклонении продольной оси, весьма склонен расширяться в одном конце и сжиматься в другом, что не только страшно нарушает направление продольной оси, но и может служить причиной образования неправильных складок и разрушения аэростата.

153. При укреплении цепи в диаметрально противоположной точке форма сечения зависит от разности давлений в низшей

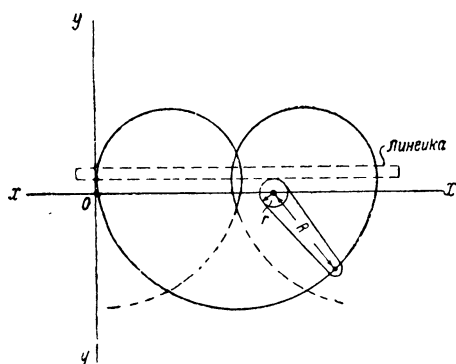
* Здесь и ниже давления в корпусе аэростата выражаются условно линейными отрезками, прямо пропорциональными существующим давлениям, b — условная линейная величина — „длина аппендикса“, D — диаметр аэростата. Например, давление в нижней точке равно $p = ab$, где a — удельная подъемная сила газа, наполняющего аэростат.

точке или от сравнительного объема газа внутри аэростата (черт. 13, *Е*, *Ж* и *З*).

Давление в низшей точке изменяется от бесконечности до нуля и менее, а сравнительный объем или площадь сечения — от 1 до $\frac{1}{2}$. Чем выше поднимается цепь, тем больше объем и тем больше давление; чем ниже она опускается, тем меньше объем и давление. В трех изображенных опытах оболочка предполагалась невесомой, т. е. грузы к нити не прикреплялись, а давление в низшей точке, определяемое несложным вычислением, последовательно было: $b = D$, $\frac{3}{4} D$ и $\frac{1}{2} D$.

Когда оболочка весома, то давление b , как увидим, при той же форме сечения меньше.

154. Этот способ прикрепления цепей можно предпочесть по многим причинам: 1) форма сечения сдавлена в отвесном направлении, отчего аэростат имеет высоту почти



Черт. 14.

в $\frac{1}{2}$ раза меньшую, чем при обыкновенном способе укрепления цепей; это позволит ему легче защищать себя от противных воздушных течений, приближаясь к поверхности земли или защищая себя деревьями; 2) большая часть цепей скрыта внутри оболочки и только незначительная их часть выглядывает из нижней полосы аэростата, что делает давление на них воздуха, при движении

воздушного корабля, минимальным; 3) общая форма сечения, в особенности нижняя часть его, близка к окружности и довольно точно совпадает с циклоидальной кривой (черт. 14), получаемой от катания без скольжения круга на прямой, причем кривую чертит точка, скрепленная с ним, но лежащая вне его; полной математической тождественности нет, но близость чересчур очевидна даже при невесомости сечения; тем более она очевидна при обыкновенной материальной оболочке аэростата; превосходство этой формы будет еще выяснено; пока только скажу, что изгибание оболочки и растяжение волн весьма малы и соответствуют изменению площади сечения; 4) несмотря на значительное изменение (почти вдвое) этой площади или объема аэростата, устойчивое направление продольной оси, как показывают опыты, по „водяному“ методу всегда сохраняется, если только цепи при наклонном аэростате не могут скользить сквозь нижнюю часть сечения, а самый аэростат не очень продолговат.

155. Уравнение циклоидальной кривой относительно оси xx , совпадающей (черт. 14) с движением центра катящегося по линейке круга, и относительно оси yy , перпендикулярной к оси

xx и проходящей через точку пересечения оси xx с самой кривой, будет:

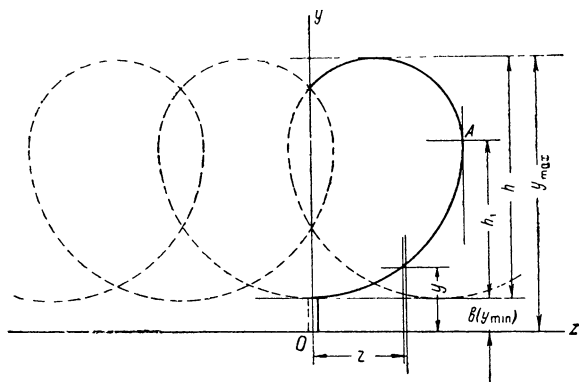
$$x = r \cdot \arcsin \left(\frac{y}{R} + R - \sqrt{R^2 - y^2} \right);$$

тут r — радиус круга, а R — расстояние чертящей точки от центра этого круга.

3. Аналитическое определение формы поперечного сечения

156. Предполагая оболочку достаточно гибкой (мягкой) и допуская постоянную ее толщину и плотность материала, сделаем попытку к аналитическому определению ее формы.

157. Прежде всего мы принуждены сделать упрощение: вообразим, что длина аэростата весьма велика по отношению к его ширине или высоте, еще точнее, мы представляем себе оболочку цилиндрической с неизвестной формой нормального сечения (черт. 15).



Черт. 15.

158. Натяжения оболочки по окружности, при ширине в единицу, обозначим через t_y и t_z как составляющие силы по направлению z и y (черт. 15).

Это натяжение складывается из давления газа и веса оболочки. Вес единицы длины z оболочки по окружности сечения обозначим через q .

Под давлением газа подразумевается разность между давлением воздуха в какой-нибудь точке A и давлением внутреннего газа в той же точке.

159. Допуская, что оболочка аэростата в низших ее частях имеет трубу (придаток — аппендикс) * длиной b , наполненную газом и сообщаящуюся с наружным воздухом, так что давление газа в нижней части трубы равно наружному давлению воздуха, найдем, что разность давлений газов в точке (z, y) равна $a \cdot y$, где a есть разность плотностей воздуха и легкого газа. Запишем же:

$$a = \gamma_B - \gamma_L.$$

* На самом деле этой трубы может и не быть. Мы хотим только удобно выразить давление в низшей точке.

160. На основании сказанного выводим:

$$dt_y = -a \cdot y \cdot dz - q ds,$$

161.

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2} \cdot dz$$

и

162.

$$dt_z = a \cdot y \cdot dy.$$

163. Так как

$$\frac{t_y}{t_z} = \frac{dy}{dz}, \text{ то } t_y = \frac{dy}{dz} \cdot t_z.$$

164. Дифференцируя это уравнение, получим:

$$dt_y = \frac{dy}{dz} \cdot dt_z + t_z \frac{d^2 y}{dz^2} \cdot dz.$$

165. Исключая из этого уравнения: dt_y , dt_z и t_z посредством предыдущих уравнений (160), (162) и (163), найдем:

$$-a \cdot y \cdot dz - q \cdot ds = a \cdot \frac{dy}{dz} \cdot y \cdot dy + \frac{d^2 y}{dz^2} \cdot dz \cdot a \int y \cdot dy.$$

166. Определяя интеграл в этом уравнении и деля на dz , получим:

$$-a \cdot y - q \cdot \frac{ds}{dz} = a \cdot y \cdot \left(\frac{dy}{dz}\right)^2 + \left(\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1\right) \cdot \frac{d^2 y}{dz^2},$$

где C_1 есть постоянное.

167. Это уравнение можно сделать уравнением первого порядка, положив:

$$\frac{dy}{dz} = y', \text{ причем } ds = \sqrt{1 + y'^2} \cdot dz$$

и

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{dy'}{dz} = \frac{dy'}{dz} \cdot \frac{dy}{dy} = \frac{dy'}{dy} \cdot \frac{dy}{dz} = \frac{dy'}{dy} \cdot y'.$$

168. Заменив по этим формулам величины уравнения (166), получим:

$$-a \cdot y - q \sqrt{1 + y'^2} = a \cdot y \cdot y'^2 + \left(\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1\right) \cdot \frac{dy'}{dy} \cdot y',$$

это — уравнение первого порядка, но не линейное.

169. Из него найдем:

$$\left(\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1\right) y' \cdot dy' + [a \cdot y \cdot (1 + y'^2) + q \sqrt{1 + y'^2}] dy' = 0.$$

170. Переменные тут не разделяются; но выражение можно упростить: положим, $1 + y'^2 = u^2$; отсюда $y' \cdot dy' = u \cdot du$; следовательно, сокращая на u , получим:

$$\left(\frac{a}{2} y^2 + C_1\right) \cdot du + (a \cdot y \cdot u + q) \cdot dy = 0.$$

171. Здесь условие интегрируемости соблюдается, поэтому

$$\begin{aligned} \int \left(\frac{a}{2} y^2 + C_1\right) \cdot du + \int \left(a \cdot y \cdot u + q - \int a \cdot y \cdot du\right) dy = \\ = \left(\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1\right) u + q \cdot y = C_2. \end{aligned}$$

Тут C_2 есть второе постоянное.

172. Из последнего уравнения найдем:

$$u = \frac{C_2 - q \cdot y}{\frac{a}{2} y^2 + C_1}.$$

173. Но этим еще дело не окончилось, ибо, освобождаясь от обозначений (167 и 170), получим:

$$\frac{dy}{dz} = \frac{\sqrt{(C_2 - q \cdot y)^2 - \left(\frac{a}{2} y^2 + C_1\right)^2}}{\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1},$$

или

$$\frac{dy}{dz} = \sqrt{\left(\frac{C_2 - q \cdot y}{\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1}\right)^2 - 1}.$$

174. Для интегрирования найдем:

$$dz = \frac{\left(\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1\right) \cdot dy}{\sqrt{(C_2 - q \cdot y)^2 - \left(\frac{a}{2} y^2 + C_1\right)^2}}.$$

Формула (173) дает для каждого y две равных производных, но с разными знаками; из этого видно, что кривая симметрична относительно некоторой оси, параллельной оси ординат.

* То же интегрирование будет более привычным, если, написав для краткости $\frac{a}{2} y^2 + C_1 = M$ и $a \cdot y \cdot u + q = N$, из уравнения (170) получим: $M du + N dy = 0$.

Откуда $\int \left(M + \frac{df N dy}{du}\right) du + \int N dy = C_2$. Путем преобразования можем получить левую часть (171) или, проделав указанные действия — его правую часть.

Прим. ред.

175. Полагая в уравнении (173) $\frac{dy}{dz} = 0$ и применяя его к принятому нами аэростату (черт. 1), найдем, что тогда $y_{\min} = b$ и $y_{\max} = b + h$, где b — высота аппендикса и h — высота оболочки*.

176. Это дает возможность определить постоянные C_1 и C_2 . Именнo, из (173), для определения двух постоянных получим четыре пары уравнений:

$$177. \quad \begin{cases} C_2 - q \cdot y_{\min} = \frac{a}{2} \cdot y_{\min}^2 + C_1 \\ C_2 - q \cdot y_{\max} = -\frac{a}{2} \cdot y_{\max}^2 - C_1 \end{cases}$$

$$178. \quad \begin{cases} C_2 - q \cdot y_{\min} = -\frac{a}{2} \cdot y_{\min}^2 - C_1 \\ C_2 - q \cdot y_{\max} = \frac{a}{2} \cdot y_{\max}^2 + C_1 \end{cases}$$

$$179. \quad \begin{cases} C_2 - q \cdot y_{\min} = -\frac{a}{2} \cdot y_{\min}^2 - C_1 \\ C_2 - q \cdot y_{\max} = -\frac{a}{2} \cdot y_{\max}^2 - C_1 \end{cases}$$

$$180. \quad \begin{cases} C_2 - q \cdot y_{\min} = \frac{a}{2} \cdot y_{\min}^2 + C_1 \\ C_2 - q \cdot y_{\max} = \frac{a}{2} \cdot y_{\max}^2 + C_1 \end{cases}$$

Из первой пары уравнений получим:

$$181. \quad -C_1 = \frac{a}{4} \cdot (y_{\max}^2 + y_{\min}^2) - \frac{q}{2} \cdot (y_{\max} - y_{\min}).$$

$$182. \quad C_2 = -\frac{a}{4} \cdot (y_{\max}^2 - y_{\min}^2) + \frac{q}{2} \cdot (y_{\max} + y_{\min}).$$

Эти уравнения, как увидим, применяются к обыкновенной весомости оболочки, или когда вообще стремление легкого газа или жидкости, заключенной в оболочке, как бы противоположно направлению тяжести. Так бывает в применении к аэростату.

Из второй пары уравнений найдем:

$$183. \quad -C_1 = \frac{a}{4} \cdot (y_{\max}^2 + y_{\min}^2) + \frac{q}{2} \cdot (y_{\max} - y_{\min}).$$

$$184. \quad C_2 = \frac{a}{4} \cdot (y_{\max}^2 - y_{\min}^2) + \frac{q}{2} \cdot (y_{\max} + y_{\min}).$$

* Из черт. 12 видим, что $\frac{dy}{dz} = 0$ в двух случаях: 1) когда $y = b$ ■
2) когда $y = b + h$.

Эти уравнения применяются к отрицательной весомости, или, вообще когда кажущееся стремление заключенной внутри оболочки жидкости совпадает по направлению с тяжестью оболочки. Этот случай имеет место, когда определяется форма цилиндрического мешка, наполненного жидкостью или газом, более тяжелым, чем окружающая его внешняя среда, например, воздух.

Из третьей пары уравнений и четвертой нельзя определить постоянные, но тогда получим:

$$185. \quad y_{\min} = \frac{q}{a} - \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2}, \text{ или } b = \frac{q}{a} - \frac{h}{2}.$$

$$186. \quad y_{\min} = -\frac{q}{a} - \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2}, \text{ или } b = -\frac{q}{a} - \frac{h}{2}.$$

187. Положим, что когда производная $\left(\frac{dy}{dz}\right)$ равна бесконечности, то $y - b = h_1$ (черт. 12); тогда из уравнения (173) найдем: $h_1 + b = \sqrt{\frac{-2C_1}{a}}$. Отсюда видно, что C_1 должно быть отрицательно.

Также видно, на основании уравнений (181) и (183), что h_1 будет меньше в случае положительной весомости, чем в случае отрицательной (черт. 15).

Также нетрудно показать, что в случае бесконечно большого давления p в низшей точке оболочки ($b = \infty$), как при положительной, так и при отрицательной весомости, $h_1 = \frac{h}{2}$, что может служить проверкой формул.

188. Исключая C_1 из последнего уравнения, найдем в случае положительной весомости (азростат):

$$h_1 + y_{\min} = \sqrt{{}^{1/2} \cdot (y_{\max}^2 + y_{\min}^2) - \frac{q \cdot (y_{\max} - y_{\min})}{a}},$$

в случае же отрицательной:

$$h_1 + y_{\min} = \sqrt{{}^{1/2} \cdot (y_{\max}^2 + y_{\min}^2) + \frac{q \cdot (y_{\max} - y_{\min})}{a}}.$$

189. Если оболочка невесома, т. е. $q = 0$, то получим:

$$h_1 + y_{\min} = \sqrt{{}^{1/2} \cdot (y_{\max}^2 + y_{\min}^2)}.$$

Чем будет больше b , тем меньше будет h_1 в сравнении с h ; при $b = 0$

$$h_1 = \frac{h}{\sqrt{2}} = \frac{h}{2} \sqrt{2}.$$

190. По известной формуле можем определить радиус кривизны искомой кривой. Именно, из уравнений (170) и (172) найдем

$$\left(\frac{dy}{dz}\right)^2 = \left(\frac{C_2 - q \cdot y}{\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1}\right)^2 - 1.$$

191. Затем

$$\frac{ds}{dz} = \pm \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2} = \pm \frac{C_2 - q \cdot y}{\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1}.$$

192. Из уравнений (166) получим:

$$-\frac{d^2y}{dz^2} = \frac{q \cdot \frac{ds}{dz} + ay \cdot \left[\left(\frac{dy}{dz}\right)^2 + 1\right]}{\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1}.$$

193. Наконец, из этого и предыдущих уравнений, найдем радиус ρ кривизны:

$$\rho = \frac{\left(\frac{ds}{dz}\right)^3}{\frac{d^2y}{dz^2}} = \frac{\mp (C_2 - qy)^2}{q \cdot \left(\frac{a}{2} y^2 + C_1\right) + a \cdot y (C_2 - q \cdot y)}.$$

194. Напомним, что q есть вес единицы длины оболочки при ширине в единицу; a есть разность между плотностями внешней и внутренней жидкости и равно: $\gamma_B - \gamma_T$; $(a \cdot b)$ выражает давление в низшей точке оболочки; $(a \cdot y)$ — давление на высоте y ; (C_1) и (C_2) — постоянные, определяемые из уравнений (181) и (182) в случае обыкновенной положительной тяжести и из уравнений (183) и (184) — в случае тяжести отрицательной.

195. Вообразим круглое сечение цилиндрического аэростата высотой, равной h *. Подъемная сила этого круглого цилиндра будет $\frac{\pi h}{4} \cdot a$. Положим, что $\frac{1}{n}$ часть этой подъемной силы равна весу оболочки этого (незакрытого, конечно,) цилиндра. Тогда получим:

$$\frac{1}{n} \cdot \frac{\pi \cdot h^2}{4} \cdot a = \pi \cdot h \cdot q,$$

откуда

$$q = \frac{a \cdot h}{4 \cdot n}.$$

* Ширина цилиндра предполагается равной единице.

196. Мы этим хотим приблизительно обозначить, что вес оболочек составляет определенную часть $\left(\frac{1}{n}\right)$ подъемной силы аэростата.

Исключая q из постоянных C_1 и C_2 и из уравнения (194), а также исключая из последнего и самые постоянные и заменяя выражения $y_{\max}$ и $y_{\min}$ через их численные значения ($y_{\max} = h + b$ и $y_{\min} = b$) (черт. 15), получим для аэростата (весомость положительна) *:

$$\rho = \frac{h \left(1 + \frac{2b}{h} - \frac{1}{2n} + \frac{y-b}{n \cdot h}\right)^2}{\frac{2}{n} \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^2 - \frac{1}{n} \cdot \left(1 + \frac{2b}{h} + \frac{2b^2}{h^2} - \frac{1}{2n}\right) - 4 \cdot \frac{y}{h} \cdot \left(1 + \frac{2b}{h} - \frac{1}{2n} + \frac{y-b}{n \cdot h}\right)}.$$

197. Также для газа, более тяжелого, чем воздух, или для мешка с жидкостью, например с водой, найдем:

$$\rho = \frac{h \left(1 + \frac{2b}{h} + \frac{1}{2n} - \frac{y-b}{n \cdot h}\right)^2}{\frac{2}{n} \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^2 - \frac{1}{n} \cdot \left(1 + \frac{2b}{h} + \frac{2b^2}{h^2} + \frac{1}{2n}\right) + 4 \cdot \frac{y}{h} \cdot \left(1 + \frac{2b}{h} + \frac{1}{2n} - \frac{y-b}{n \cdot h}\right)}.$$

198. Из этих уравнений видно, что кривая имеет весьма сложный вид и форма ее зависит от сравнительной массивности $\left(\frac{1}{n}\right)$ оболочки и от сравнительного давления $\frac{b}{h}$ в ее низшей точке. Если эти величины будут постоянны, то все кривые будут подобны между собою. Понятно, что форма кривой также зависит от направления тяжести по отношению к направлению давления газов, что видно из различий между двумя последними уравнениями.

199. При $\frac{b}{h}$, равном бесконечности, радиус кривизны по обоим уравнениям становится постоянным и равным $\frac{h}{2}$ — половине высоты оболочки, т. е. кривая обращается в круг.

200. По первому уравнению, для аэростата, при $n=1$, т. е. когда вес оболочки равен подъемной силе газа, кривая тоже обращается в круг при всяком давлении b в низшей точке, ибо из первого уравнения найдем $\rho = \frac{1}{2} h$.

Тот же вывод получим, если из уравнения окружности относительно ее касательной отыщем производные и пр. и вставим в уравнение (166). Найдем, что это уравнение удовлетворяется; а потому, когда $n=1$ и тяжесть положительна, кривая есть окружность.

Положим в уравнении (196) $n=2$, а отношение $\frac{b}{h}$ последовательно: 0; $\frac{1}{8}$; 0,14; 0,15; $\frac{1}{5}$; $\frac{1}{4}$; $\frac{1}{2}$; 1.

* Т. е. обыкновенная тяжесть.

Тогда получим следующие формулы для вычисления радиусов ρ кривизны кривых, ограничивающих сечения аэростата. Для краткости в формулах положено: $\frac{y-b}{h} = k$, но так как h или высоту оболочки мы положили равной единице, то $y-b = k$.

При разных k получим и разные радиусы, что и выразим в табличках:

$$\frac{b}{h} = 0; \rho = \frac{(3+2k)^2}{16k(3+k)+6}; n=2$$

k	0	0,2	0,5	1,0
ρ	1,500	0,714	0,471	0,357

201. $\frac{b}{h} = \frac{1}{8}; \rho = \frac{(2+k)^2}{4k(k+4)+4}; n=2$

k	0	0,2	0,5	1,0
ρ	1,000	0,658	0,480	0,375

202. $\frac{b}{h} = 0,14; \rho = \frac{(2,06+k)^2}{4k(k+4,12)+4,31}; n=2$

k	0	0,2	0,5	1,0
ρ	0,984	0,657	0,484	0,378

203. $\frac{b}{h} = 0,15; \rho = \frac{(2,1+k)^2}{4k \cdot (k+4,2)+4,62}; n=2$

k	0	0,2	0,5	1,0
ρ	0,955	0,650	0,482	0,378

Нет ничего легче, как по этим немногим даже радиусам построить очень точные кривые; но пойдем далее:

204. $\frac{b}{h} = \frac{1}{5}; \rho = \frac{(2,3+k)^2}{4k(k+4,6)+5,98}; n=2$

k	0	0,2	0,5	1,0
ρ	0,885	0,636	0,485	0,384

205. $\frac{b}{h} = \frac{1}{4}; \rho = \frac{(5+2k)^2}{16k(k+5)+30}; n=2$

k	0	0,2	0,5	1,0
ρ	0,833	0,617	0,486	0,389

206. $\frac{b}{h} = \frac{1}{2}; \rho = \frac{(7+2k)^2}{16k(k+7)+70}; n=2$

k	0	0,2	0,5	1,0
ρ	0,700	0,589	0,492	0,404

207. $\frac{b}{h} = 1$; $\rho = \frac{(11 + 2k)^2}{16k(k + 11) + 198}$; $n = 2$

k	0	0,4	1,0
ρ	0,611	0,514	0,433

208. По этим данным можем построить кривые, полученные выше опытным путем (черт. 16).

Рассматривая их, видим, что все они формой напоминают удлиненные циклоиды (черт. 15), что давление $\frac{b}{h}$ в низшей точке

не может быть менее 0,237, ибо в противном случае кривая не замыкается, т. е. не пересекает ось ординат. Видим, что с увеличением давления в низшей точке кривая все более округляется, но двойная (или полная) ширина ее все-таки заметно превышает высоту.

209. Если построим кривые по формуле (197), то увидим, что мешок с газом или жидкостью, более тяжелой, чем воздух, имеет в сечении вид тех же кривых, только повернутых низом вверх. Заметим, также, что они менее продолговаты в горизонтальном направлении, чем кривые аэростата, и требуют несравненно большего давления $\frac{b}{h}$ в низшей точке.

210. Среднее место занимают кривые с невесомой оболочкой; их свойства промежуточны, т. е. они имеют среднюю удлиненность в горизонтальном направлении и требуют среднего давления в низшей точке оболочки.

211. Легко видеть и зависимость формы оболочки аэростата от ее сравнительной весомости $\frac{1}{n}$ при одном и том же давлении

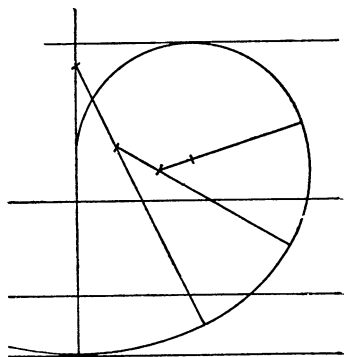
в низшей точке. Положив, например, $\frac{b}{h} = \frac{1}{2}$, а n последовательно:

1, 2 и ∞ (или весомость $\frac{1}{n}$ оболочки — в $1, \frac{1}{2}$ и 0), по уравнению (196) можем построить три кривых. Первая кривая будет круг, а затем, по мере уменьшения весомости $\frac{1}{n}$, кривая становится все более и более продолговатой в горизонтальном направлении.

212. Для построения невесомых оболочек получим весьма простые формулы, если в уравнении (196) или (197) положим $n = \infty$.

Тогда получим:

$$\rho = \frac{C_2}{a \cdot y}.$$



Черт. 16.

Если же в уравнения (183) и (184) положить $q = 0$, то получим:

$$-C_1 = \frac{a}{4} [y_{\max}^2 + y_{\min}^2].$$

$$C_2 = \frac{a}{4} [y_{\max}^2 - y_{\min}^2].$$

213. Следовательно:

$$\rho = \frac{h}{4} \frac{y_{\max} + y_{\min}}{y}, \text{ или } \rho = \frac{h}{4} \cdot \frac{h + 2b}{y}.$$

214. Из уравнений же (196) и (197), при $n \rightarrow \infty$, получим то же самое:

$$\rho = \frac{\left(1 + \frac{2b}{h}\right)^2}{4 \frac{y}{h} \left(1 + \frac{2b}{h}\right)} = \frac{h}{4} \cdot \frac{h + 2b}{y}.$$

215. Из последних формул видно, что с увеличением ординаты y радиус кривизны непрерывно уменьшается. Если $y = b$, то ρ будет наибольшим; тогда

$$\rho_{\max} = \frac{h}{2} \cdot \left(\frac{h}{2b} + 1\right).$$

Если $y = h + b$, то получим наибольшую кривизну, именно:

$$\rho_{\min} = \frac{h}{4} \cdot \left(1 + \frac{b}{h + b}\right).$$

Отношение

$$\frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}} = \frac{h}{b} + 1.$$

216. Если еще и $b = 0$ (т. е. давления в низшей точке нет), то радиус ρ кривизны колеблется от бесконечно большой величины до $\frac{h}{4}$.

217. При возрастании b , или давления в низшей точке, радиус ρ внизу уменьшается, а сверху увеличивается. При бесконечно большом b , понятно, кривая должна обратиться в окружность и, действительно, из формулы (213) найдем, что $\rho = \frac{1}{2} \cdot h$, т. е. получим постоянный радиус, равный половине высоты h оболочки.

218. Формул (196) и (197) совершенно достаточно для самого точного вычерчивания кривых сечения аэростата и для опытного исследования полученных кривых во всех отношениях и подробностях.

Но все-таки дадим и некоторые теоретические данные для той же цели. Производная $\left(\frac{dy}{dz}\right)$ выражается формулой (173); для определения уравнения кривой имеем формулу (174).

219. Вторую производную приводим тут:

$$-\frac{d^2y}{dz^2} = \frac{(C_2 - q \cdot y) \cdot \left[a \cdot y \cdot (C_2 - q \cdot y) + q \cdot \left(\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1 \right) \right]}{\left(\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1 \right)^3}.$$

220. Далее, даем дифференциал дуги ds :

$$\frac{ds}{dy} = \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dy} \right)^2}.$$

Или, по уравнению (173), найдем:

$$ds = \frac{(C_2 - q \cdot y) dy}{\sqrt{(C_2 - q \cdot y)^2 - \left(\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1 \right)^2}}.$$

221. Наконец дифференциал площади сечения равен $(y - b) \cdot dz$; следовательно:

$$(y - b) dz = \frac{\left(\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1 \right) \cdot (y - b) dy}{\sqrt{(C_2 - q \cdot y)^2 - \left(\frac{a}{2} \cdot y^2 + C_1 \right)^2}}.$$

222. Уравнения этой главы при других постоянных можно применять и при ином способе привешивания ладьи; а также их можно применять для определения формы сечения более или менее раздутого аэростата, — когда нижняя часть оболочки образует входящий или выходящий угол.

VII. Металлическая волнистая поверхность аэростата Растяжение и сгибание ее*

Поверхность вращения превращается в двойную плоскость

Кроме описанного в гл. V *устройство* волнистой оболочки воздушного корабля может быть иное. Основываясь на нем, мы выведем формулы, относящиеся к гофрированной поверхности аэростата и необходимые для построения ее по той или другой системе.

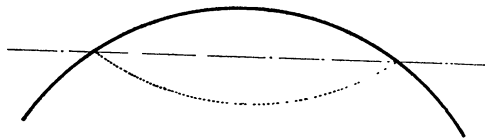
223. Представим себе, что аэростат сперва имеет вид поверхности, полученной от вращения (черт. 17) какой-нибудь плавной кривой вокруг ее хорды.

Преобразуем теперь эту поверхность так, чтобы она получила необходимые нам свойства (гл. V).

Для этого разрежем ее на множество частей посредством плоскостей, перпендикулярных ее продольной оси (черт. 18).

* Часть этой главы заимствована из моей книги: „Аэростат металлический, управляемый“ (1892 и 1893 гг.).

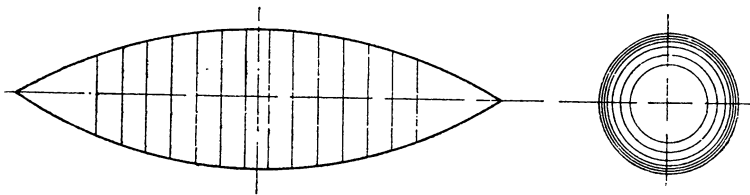
Каждую часть без большой погрешности можем принять за боковую поверхность усеченного конуса; только концы аэростата примем за боковые поверхности полных конусов.



Черт. 17.

224. Конические поверхности имеют свойства складываться в плоскость, не давая складок. Сложим все конусы на одну плоскость в том же порядке, в каком они находились ранее, и постараемся их приложить

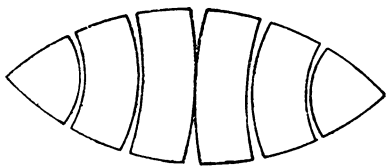
друг к другу так, чтобы между соседними конусами не было промежутков и чтобы поверхность одного конуса не закрывала поверхности соседнего. Мы этого никогда не достигнем (черт. 19). По средней линии рисунка сложенные конические поверхности



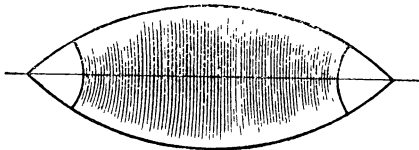
Черт. 18.

имеют соприкосновение, но чем ближе к краям фигуры, тем они более расходятся; понятно, что поверхности, изображенные тут, двойные.

Если бы края промежутков последнего чертежа были параллельны, то их можно бы было сблизить и соединить.



Черт. 19.



Черт. 20.

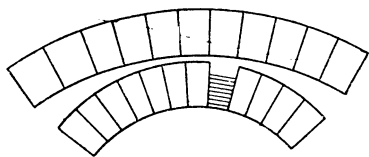
225. Положим, что полосы (черт. 19) весьма узки, причем будут, конечно, узки и промежутки между ними. Изогнем каждую полосу горбом или желобком. По средней продольной линии рисунка пусть желобки будут глубже или горбы — круче, а чем дальше от средней линии, тем мельче или ниже. Тогда средние части полос сократятся поперек и края промежутков будут эквидистантны. После этого мы имеем возможность их сблизить и соединить. Конечные конусы (черт. 19) остаются без изменения.

226. Итак, аэростат сначала был разрезан на узкие части, затем части эти сложили на плоскость и придали им желобчатый вид и, наконец, соединили те самые края, или те самые точки поверхности аэростата, которые были в соединении и раньше.

В результате — как бы сложенный, искусно и без разрыва, на плоскость аэростат (черт. 20), покрытый поперечными дугообразными морщинами, высота которых тем более, чем ближе они расположены к средней линии сложенного металлического мешка; только края последнего да полные конусы совершенно гладки. При раздувании аэростата эти морщины более или менее сглаживаются, т. е. высота их уменьшается. Но полного раздутия или разглаживания получить нельзя, не разорвав оболочку. Поэтому волны оболочки должны быть круче, чтобы и при полном раздутии не было полного разглаживания волн; излишний размер волн, во-первых, не мешает, во-вторых, придаст оболочке большую жесткость, в-третьих, — и это главное — даст ей возможность свободно принять ту форму поверхности, сечение которой изображено на черт. 1, и значительно притом изменять ее.

227. Если мы допустим, что складки или волны аэростата достаточно мелки, самый аэростат достаточно велик и сделан из материала довольно тонкого и упругого, то полученный нами металлический мешок будет обладать теми свойствами, о которых я говорю и говорил. К этим свойствам следует еще прибавить, что волнообразная поверхность аэростата придает ему особую упругость, вследствие которой аэростат, несмотря на значительные изменения его формы и объема, „пружинит“, не давая неправильных и неожиданных складок и имея вполне достаточное сопротивление силам, стремящимся его разрушить.

228. Хотя вышеприведенное представление об устройстве складывающегося металлического аэростата и очень полезно для уяснения его способности изменять форму сообразно действующим на него силам, но на практике аэростат может быть придется строить из листов * и потому предложу другой способ построения его на плоскости.



Черт. 21.

Возьмем две соседних конических поверхности в сложенном виде и разрежем их на листы так, как показано на черт. 21. Если пропустить каждый лист через зубчатые валы, т. е. через цилиндры, покрытые волнами, гребни которых параллельны осям цилиндров, то длина листов сократится.

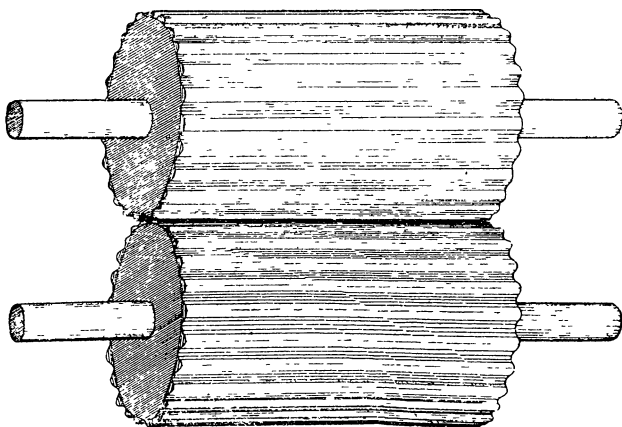
Употребляя валы с нарезками разной глубины или с волнами разной высоты, также отодвигая валы друг от друга на некоторое небольшое расстояние, мы можем сокращать листы

* В настоящее время доступен металл в рулонах и это делает особенно удобным способ сборки, описанный ниже в (342).

на разную величину, не изменяя числа волн на каждом листе постоянной величины.

229. Можно и так их сократить, что при размещении их на прежние места (черт. 21) края промежутков будут параллельны; для этого, конечно, листам придают волны, параллельные направлению полосы и тем более крутые, чем ближе они расположены к серединной линии сложенного на плоскость аэростата.

Тогда остается сблизить и соединить все те точки аэростата, которые были в соединении и раньше.



Черт. 22.

Понятно, он будет иметь совершенно тот же вид (черт. 20), какой мы описали при другом способе образования складывающегося металлического мешка.

230. Можно придавать волнистость не всем кольцам (или полосам) под ряд, а через одно.

Геометрическая часть расчетов

Но приступим к расчетам. Сначала произведем чисто геометрические вычисления, а затем и механические; именно — узнаем прежде радиусы и углы конусов, из которых состоит газоместилище, и промежутки между соседними кольцами (черт. 19); зная эти промежутки, нетрудно уже определить и величину сокращения, необходимого для того, чтобы сойтись им в одну плоскость и друг с другом с целью составления мешка, со всех сторон закрытого.

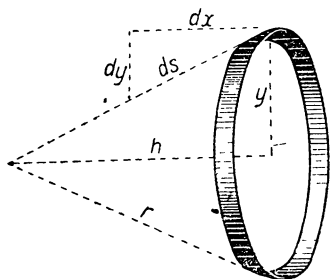
231. Положим, что уравнение кривой (черт. 17), образующей своим вращением вокруг хорды поверхность аэростата, будет: $y = F(x)$; причем хорда взята за ось абсцисс, а середина ее — за начало прямоугольных координат. Тогда из черт. 23, где изображен один из усеченных конусов в натуральном, т. е. не сложенном виде, и где r есть касательная к данной кривой,

или полная образующая конуса, h — высота его, а y — радиус основания, найдем:

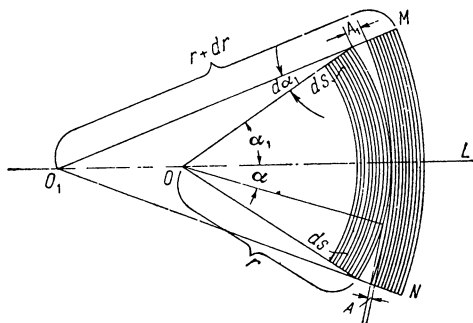
$$232. \quad \frac{dy}{dx} = \frac{y}{h} \quad \text{и} \quad r^2 = h^2 + y^2;$$

откуда

$$233. \quad r = y \left[1 + \left(\frac{dx}{dy} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$



Черт. 23.



Черт. 24.

Мы определили образующую r полного конуса, или радиус сложенного вдвое усеченного конуса, имеющего вид части кольца черт. 24. По этому чертежу мы получим длину дуги ML :

$$234. \quad ML = \frac{2\pi y}{4} = \frac{\pi y}{2}.$$

Следовательно, обозначая 360° через 2π , имеем следующее выражение для угла α_1 , соответствующего дуге ML :

$$235. \quad \alpha_1 = \frac{MN}{r} = \frac{\pi y}{2r}.$$

На основании же последнего уравнения и уравнения (233) выведем:

$$236. \quad \alpha_1 = \frac{\pi}{2} \left[1 + \left(\frac{dx}{dy} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}.$$

Узнаем теперь величину крайнего промежутка (т.е. наибольшего для данной пары сложенных колец) между двумя сложенными на плоскость конусами (черт. 24), которую обозначим через A_1 .

Рассматривая внимательно черт. 24, где r есть внешний радиус одного кольца, а $(r + dr)$ — внешний радиус соседнего и где ds есть ширина кольца, которая равна:

$$237. \quad ds = \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot dx,$$

составим следующее уравнение:

$$238. \quad (r + dr) = OO_1 \cdot \cos(\alpha_1 - d\alpha_1) + r \cdot \cos(d\alpha_1) + A_1 + ds = \\ = OO_1 \cdot \cos \alpha_1 + r + A_1 + ds.$$

$$239. \quad \text{Но} \quad OO_1 = (r + dr) - r - ds = dr - ds.$$

240. Стало быть:

$$A_1 = \left(\frac{dr}{dx} - \frac{ds}{dx} \right) \cdot (1 - \cos \alpha_1) \cdot dx.$$

Здесь угол α_1 узнается по формуле (236); но угол может быть и меньше α_1 , и тогда получим не наибольший промежуток A_1 , находящийся у края сложенного кольца, а другие — меньшие A и ближайшие к средней точке C (черт. 24); поэтому формулу (240) можно принимать и вообще; итак, получим:

$$241. \quad A = \left(\frac{dr}{dx} - \frac{ds}{dx} \right) \cdot (1 - \cos \alpha) \cdot dx;$$

тут угол α не вполне произволен, но должен удовлетворять условию:

$$242. \quad \alpha \leq \frac{\pi}{2} \cdot \left[1 + \left(\frac{dx}{dy} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}},$$

т. е. должен быть меньше α_1 (236).

243. Зная A_1 и A , легко видеть, что сокращение отдельного листа dA , составляющего элемент кольца (так же, как и это последнее, составляет элемент аэростата), равно: $dA = A_1 - A$, т. е. оно равно наибольшему промежутку данной пары колец без того промежутка, который соответствует положению данного листа.

244. Если известно уравнение образующей (черт. 17) поверхность газоместиллица, то, как ни будь сложна его форма, без малейших затруднений, по вышеприведенным уравнениям можем узнать радиусы r колец (уравнение 233), длину их (234), их углы (уравнение 236), промежутки A и A_1 (241 и 240) и сокращение каждого листа dA , представляющего элемент аэростата второго порядка.

245. Из уравнения (241) мы видим, что для одного и того же кольца, или для постоянной величины абсциссы x , промежуток A пропорционален $[1 - \cos(\alpha)]$; но приблизительно $1 - \cos(\alpha) = \frac{\alpha^2}{2}$, т. е.

промежуток независимо от формы образующей или вида данного уравнения ее (231) пропорционален квадрату угла α или расстоянию по дуге MN от средней точки L (черт. 24).

246. Выведенные нами уравнения, содержа радиус (223) и дугу s , довольно сложны. Но для предварительных соображений их можно упростить. Притом вычисления величины волн гофрированной поверхности оболочки и не требуют особенной точности, так как эти волны делаются с большим запасом для излишнего растяжения; так что упрощенные выражения нам пригодятся и для построения оболочки.

Приблизительно имеем [черт. 23 и формула (233)], если аэростат достаточно продолговат:

$$247. \quad r = h = y \cdot \frac{dx}{dy};$$

$$248. \quad \frac{ds}{dx} = 1.$$

Из (247), дифференцируя, найдем:

$$249. \quad \frac{dr}{dx} = 1 - y \left(\frac{dx}{dy} \right)^2 \cdot \frac{d^2y}{dx^2}.$$

Следовательно:

$$250. \quad \frac{dr}{dx} - \frac{ds}{dx} = -y \left(\frac{dx}{dy} \right)^2 \cdot \frac{d^2y}{dx^2}.$$

Далее, приблизительно из (236) и (245) получим:

$$251. \quad \alpha_1 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{dy}{dx}.$$

$$252. \quad 1 - \cos(\alpha_1) = \frac{\alpha^2}{2} = \frac{\pi^2}{8} \cdot \left(\frac{dy}{dx} \right)^2.$$

Теперь из (240) найдем:

$$253. \quad A_1 = \frac{-\pi^2}{8} \cdot y \cdot \frac{d^2y}{dx^2} dx.$$

254. Если, например, $y = F(x) = y_1 \cdot \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right)$, т. е. если аэростат образуется вращением дуги параболы вокруг ее хорды $2x_1$, перпендикулярной оси параболы, то получим такое приближенное выражение для величины крайнего промежутка A_1 :

$$A_1 = \frac{\pi^2 \cdot y_1^2}{4x_1^2} \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right) dx = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \cdot \frac{y}{y_1} \cdot dx.$$

Здесь, так же как и в предыдущем уравнении, $2x_1$ есть длина оболочки, а $2y_1$ — высота ее или наибольший поперечник.

255. Из формулы видно, что для одного и того же аэростата крайний промежуток A_1 пропорционален $2y$, т. е. поперечному диаметру рассматриваемого сечения оболочки и ширине dx , или ds кольца. Поблизости к концам оболочки промежутки между кольцами будут так малы, что складками на концах оболочки

пренебрегают и делают их из сплошных и гладких конических поверхностей.

256. Из той же формулы видно, что при постоянных $\frac{x}{x_1}$ и dx , но для оболочек разной продолговатости $\frac{x_1}{y_1}$, величина A_1 обратно пропорциональна квадрату этой продолговатости. Так, если бы продолговатость оболочки, при том же уравнении кривой, увеличилась в 3 раза, то промежутки между кольцами A_1 уменьшились бы в 9 раз.

257. Последняя формула дает нам также наибольшее *относительное* сокращение $\frac{A_1}{dx}$ листа (см. черт. 21 и 24). Полагая в ней продолговатость $\frac{x_1}{y_1}$ оболочки равной 7, а $\frac{x}{x_1}$ последовательно равным 0, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{7}{8}$ и 1, для относительного сокращения $\frac{A_1}{dx}$ вычислим: $\frac{1}{20}$, $\frac{1}{26}$, $\frac{1}{46}$, $\frac{1}{85}$ и 0.

258. Когда оболочка имеет форму эллипсоида вращения, то

$$y = F(x) = y_1 \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}$$

и

$$\frac{A_1}{dx} = \frac{\frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2}}{\left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)} = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \cdot \frac{y_1^2}{y^2}.$$

Отсюда видно, что в случае эллипсоида величина $\frac{A_1}{dx}$ крайнего промежутка или наибольшего сокращения листа быстро увеличивается к концам оболочки. Полагая опять $\frac{x_1}{y_1} = 7$, а $\frac{x}{x_1}$ последовательно: 0, $\frac{1}{5}$, $\frac{2}{5}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{4}{5}$, найдем соответствующие величины для $\frac{A_1}{dx}$: $\frac{1}{40}$, $\frac{1}{38}$, $\frac{1}{34}$, $\frac{1}{26}$ и $\frac{1}{14}$.

259. Если положим, что

$$y = F(x) = y_1 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)^{\frac{3}{4}},$$

где показатель $\frac{3}{4}$ есть среднее арифметическое число между показателями уравнений двух предыдущих кривых, то найдем:

$$\frac{A_1}{dx} = \frac{3\pi^2}{32} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \cdot \frac{\left(2 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}}.$$

Полагая и тут $\frac{x_1}{y_1} = 7$ и $\frac{x}{x_1}$, последовательно: $0, \frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}, \frac{4}{5}$ найдем для $\frac{A_1}{dx}$: $\frac{1}{26}, \frac{1}{26}, \frac{1}{26}, \frac{1}{25.5}$ и $\frac{1}{22}$.

Следовательно, могут быть и такие формы оболочки, при которых величина крайнего промежутка приблизительно одинакова от переднего конца до заднего конца аэростата.

260. Для удлиненной косинусоиды

$$y = F(x) = y_1 \cos \left(\frac{\pi \cdot x}{2x_1} \right)$$

и

$$\frac{A_1}{dx} = \frac{\pi^4}{32} \cdot \left(\frac{y}{x_1} \right) \cdot \left(\frac{y_1}{x_1} \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot x}{2x_1} \right) = \frac{\pi^4}{32} \cdot \frac{y^2}{x_1^2}.$$

Значит, при этой форме величина крайнего промежутка убывает чрезвычайно быстро к концам оболочки, именно — пропорционально квадрату диаметра $2y$ поперечного сечения оболочки. Эта форма весьма плавная, острая и легко рассекающая воздух*.

261. Можно представить последнюю формулу в виде:

$$\frac{A_1}{dx} = \frac{\pi^4}{32} \cdot \left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{y}{y_1} \right)^2.$$

Отсюда видно, как мы находили и для других поверхностей, что величина A_1 обратно пропорциональна квадрату продолговатости оболочки.

Наибольший крайний промежуток получим из последнего уравнения, положив в нем $y = y_1$. Найдем $\frac{A_1}{dx} = \frac{\pi^4}{32} \cdot \left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2$. Если $\frac{x_1}{y_1} = 7$, то $\frac{A_1}{dx} = 0,06212$, или около $\frac{1}{16.3}$.

Стало быть, в средней части мешка величина промежутка сравнительно с другими формами весьма значительна, но зато к концам оболочки она быстро убывает.

262. Можно сделать так, чтобы $\frac{A_1}{dx} = F(y)$, т. е. чтобы относительное растяжение среднего листа или величина крайнего промежутка была в желаемой зависимости от ординаты y .

Тогда получим дифференциальное уравнение (см. 253):

$$-\frac{\pi^2}{8} \cdot y \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = F(y), \text{ или } \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{F(y)}{y}.$$

* Я устраивал такой формы лодки — очень быстроходные.

Отсюда

$$x = \int \frac{dy}{\sqrt{C - \frac{16}{\pi^2} \int \frac{F(y)}{y} \cdot dy}},$$

где C есть постоянное.

263. Если, например, $F(y) = k y$, где k — постоянный множитель, то

$$\int dy = y$$

и

$$x = \int \frac{dy}{\sqrt{C - \frac{16}{\pi^2} k y}} = \frac{-\pi^2}{8k} \cdot \sqrt{C - \frac{16}{\pi^2} k y} + C_1,$$

где C_1 также — постоянное.

Это есть, очевидно, уравнение параболы, что уже мы видели (254).

Механическая часть расчетов

264. Перейдем теперь к механической части решения вопроса о построении металлической оболочки аэростата.

Из предыдущего мы видим, что все дело состоит в том, чтобы каждый лист сократить на известную величину ($A_1 - A$), придавая ему волнистую поверхность посредством прибора (черт. 22). Тогда листы, расположенные в надлежащем порядке, друг возле друга, вплотную и без малейших промежутков, и спаянные между собой, образуют плоский мешок, который при раздутии дает форму, легко рассекающую воздух (форму рыбы или веретена) без неправильных и непредвиденных складок, опасных для целости мешка.

Но сократить лист на определенную величину можно и посредством мелких и посредством крупных складок или волн (черт. 25). Спрашивается — какие же размеры должно придавать волнам?

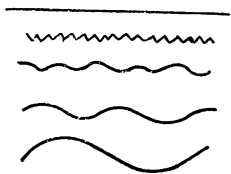
Необходимо, чтобы волны, гребни которых идут по окружности поперечного сечения аэростата, при переходе его из плоского вида в округленный, раздутый, свободно изгибались, не ломаясь и не давая трещин и неправильных изгибов.

Это условие требует волн по возможности мелких; но очень мелкие волны опять не годятся и вот почему: при раздувании аэростата и при распрямлении волн, или уменьшении высоты h их, они не только не должны давать трещин, но и должны быть настолько упруги, чтобы, при обратном складывании аэростата в плоскость, или при уменьшении его объема, могли принять прежний волнистый вид, сократившись, благодаря упругости на прежнюю величину.

Это второе условие требует не только упругости материала, но и волн по возможности больших.

265. Итак, определим наибольшие размеры волн, пока только с точки зрения безопасного поперечного изгибания поверхности аэростата.

Чтобы изгибание волнистой поверхности по окружности поперечного сечения аэростата можно было рассматривать как массивную пластинку толщиной в $2h$, необходимо, если размер волны велик в сравнении с толщиной жести, из которой она выгнута, — на волнах обыкновенных выбить волны более мелкие, или волны второго порядка, а на этих последних — еще более мелкие волны, или волны третьего порядка; и т. д. Надеюсь



Черт. 25.



Черт. 26.

что в практике построения аэростатов дело ограничится обыкновенными, или волнами первого порядка, и, самое большое, что потребуется, — это наведение волн второго порядка (черт. 26), что может сделать приспособление, подобное изображенному на черт. 22. Положим, что массивная поверхность толщиной в $2h$ изогнулась по окружности длиной в C ; тогда выпуклая сторона полученного цилиндра должна растянуться на величину dC , а вогнутая — настолько же сократиться; очевидно, отношение $\frac{dC}{C}$ не должно превышать отношения $\frac{\sigma}{E}$, где σ есть предельная сила, при которой материал теряет упругость (т. е., по прекращении действия сил, не принимает прежнего вида) и склонен к разрушению, а E — модуль, или коэффициент упругости, так что отношение $\frac{\sigma}{E}$ выражает предельное растяжение единицы длины вещества. Итак,

$$267. \quad \frac{dC}{C} \leq \frac{\sigma}{E};$$

здесь:

268. $C = 2\pi \cdot y$; следовательно, дифференцируя, найдем:

269. $dC = 2\pi \cdot dy$ и потому, деля почленно на первое, получим:

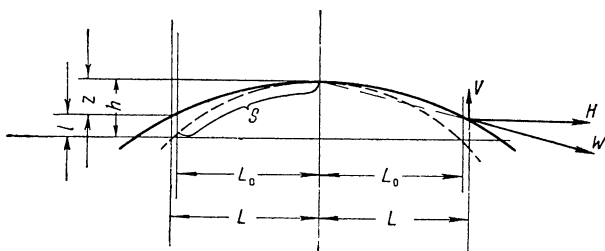
$$270. \quad \frac{dC}{C} = \frac{dy}{y} \leq \frac{\sigma}{E};$$

откуда, замечая, что $dy = h$, получим:

271. $h < y \cdot \frac{\sigma}{E}$. Понятно, что y , а следовательно, и h даже для одного аэростата, имеет переменную величину, пропорциональную диаметру поперечного сечения аэростата. Высота волн:

$$272. \quad h = y \cdot \frac{\sigma}{E}$$

вполне безопасна, так как по мере изгибания стенок воздушного корабля и расправления складок истинная высота их все более и более уменьшается, так же как и опасность излома; затем истинная высота волн не постоянна, но уменьшается по мере удаления их от средней продольной линии (черт. 20) металлического мешка.



Черт. 27.

273. Мы определили наибольшую высоту h с точки зрения размеров аэростата в поперечном его сечении; теперь определим эту высоту с точки зрения продольного упругого растяжения волнистой поверхности аэростата; именно — какой наименьшей высоты h должны быть волны, чтобы они, будучи сделаны из жести толщиной в σ , могли растягиваться на известную часть $\frac{A}{dx}$ своей длины и затем, по прекращении действия растягивающей силы, вновь сократиться на прежнюю величину y .

Пусть черт. 27 изображает часть волны от средней линии до гребня. Предполагая для удобства выражения горизонтальное расположение волн, обозначим переменную высоту волны от высшей до низшей ее точки через $2z$; таковую же постоянную высоту (когда волнистая поверхность еще не подвержена растягивающим силам) — через $2h$; наконец длину волны от одного гребня до соседней низшей точки — через $2L$. Из черт. 27 видно, что высота волны составляет малую часть ее длины*, тогда, несмотря на второстепенные волны, — лишь бы последние были подобны по форме главным, — имеем приблизительно:

$$274. \quad V = H \cdot \frac{z}{L}.$$

* Обыкновенно под длиной волны подразумевается вдвое большая величина, или $4L$. Прим. автора.

Тут выражена зависимость между продольной H и нормальной V силами, изгибающими пластинку до положения, изображенного на черт. 27.

Рассмотрим действие нормальной силы. Черт. 28 изображает пластинку толщиной в δ и шириной в единицу.

Несложное интегрирование дает формулу:

$$275. \frac{i \cdot E \cdot \delta}{3}, \text{ определяющую действие силы на рычаг } \frac{\delta}{2} \text{ (черт. 28),}$$

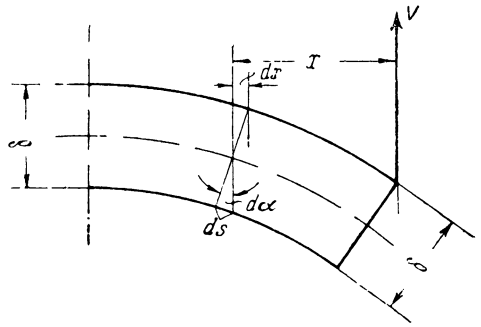
при относительном растяжении поверхностных частей изгибаемой пластинки на величину i^* . Эту силу (275) уравнивает другая сила V , действующая на рычаг длиной в x ; следовательно, на основании свойств статических моментов, имеем:

$$276. V \cdot x = \left(\frac{i \cdot E \cdot \delta}{3} \right) \cdot \frac{\delta}{2},$$

или

$$277. V = \frac{i \cdot E \cdot \delta^2}{6 \cdot x} \cdot **$$

Приблизительно имеем: $i \cdot dx = \frac{\delta}{2} \cdot d\alpha$; откуда дифференциал углового отклонения пластинки:



Черт. 28.

$$278. dx = \frac{i \cdot dx}{\frac{\delta}{2}} = \frac{2i}{\delta} \cdot dx.$$

Дифференциал же отклонения l конца ее равен:

$$279. dl = x \cdot d\alpha = \frac{2i}{\delta} \cdot x \cdot dx,$$

или, по уравнению (277), исключая i :

$$280. dl = \frac{12 \cdot V \cdot x^2}{\delta^3 \cdot E} \cdot dx.$$

* i есть растяжение единицы длины поверхностного слоя, или $\frac{\sigma}{E}$ (см. 265)
Прим. автора.

Эту же формулу можно получить, пользуясь понятием модуля сопротивления W . В данном случае $W = \frac{b \cdot \delta^3}{6}$, или принимая ширину пластинки $b = 1$, получим: $W = \frac{\delta^3}{6}$. Откуда

$$V \cdot x = W \cdot \sigma = \frac{i \cdot E \cdot \delta^2}{6} \cdot$$

Интегрируя это выражение, найдем:

$$281. \quad l = \frac{4 \cdot V \cdot x^3}{\delta^3 \cdot E}.$$

Принимая тут $x = L$ и зная, что по (247) $V = H \cdot \frac{z}{L}$, получим:

$$282. \quad l = \frac{4 \cdot H \cdot z \cdot L^2}{\delta^3 \cdot E}.$$

Это уравнение показывает отклонение конца стержня до величины z в зависимости от величины продольной растягивающей силы.

Положим в уравнении (277) $x = L$ и

$$283. \quad i = \frac{\sigma}{E};$$

тогда получим:

$$284. \quad V = \frac{\sigma \cdot \delta^2}{6L} *;$$

отсюда, при посредстве (274), найдем:

$$285. \quad H = \frac{\sigma \cdot \delta^2}{6 \cdot z},$$

или

$$286. \quad z = \frac{\sigma \cdot \delta^2}{6 \cdot H}.$$

Так как наибольшая высота волны есть h , то

287. $l = h - z$ (черт. 27); следовательно, с помощью уравнения (282) получим:

$$288. \quad H = \frac{E \cdot \delta^3}{4 \cdot L^2} \cdot \left(\frac{h - z}{z} \right).$$

Из этого уравнения и уравнения (285), исключая H , имеем:

$$289. \quad \frac{h - z}{L} = \left(1 - \frac{z}{h} \right) \cdot \frac{h}{L} = \frac{2 \cdot L \cdot \sigma}{3 \cdot \delta \cdot E};$$

очевидно, первая и вторая части этого выражения тождественны. Оно показывает относительное отклонение $\frac{h - z}{L}$ пластинки в зависимости от ее размеров и свойств материала, из которого она сделана.

* Эту формулу, выведенную автором элементарно в (274—284), можно получить, пользуясь обычными формулами теории изгиба прямого стержня: $M = V \cdot L$; $\sigma = \frac{M}{W} = \frac{V \cdot L}{\frac{\delta^2}{6}} = \frac{6 V \cdot L}{\delta^2}$. Отсюда $V = \frac{\sigma \cdot \delta^2}{6 \cdot L}$ (284). Но при этом остались бы скрытыми упрощения, изложенные в рассуждениях, приведших к выведенной формуле.

290. По отношениям $\frac{h}{L}$ и $\frac{z}{h}$ можно также узнать чисто геометрическим путем продольное растяжение волн. Нормальное сечение пластинки или волны имеет вид (черт. 27) кривой, которую вследствие малой крутизны ее можно принять за отклонившуюся прямую линию S и потому, по черт. 27 имеем приблизительно:

$$291. \quad S^2 = L^2 + z^2 \text{ и } S^2 = L_0^2 + h^2,$$

откуда

$$292. \quad \frac{S}{L} = \sqrt{1 + \left(\frac{z}{L}\right)^2} \text{ и } \frac{S}{L_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_0}\right)^2},$$

или, так как отношения $\frac{z}{L}$ и $\frac{h}{L_0}$ составляют малую часть единицы, то

$$293. \quad \frac{S}{L} = 1 + \frac{z^2}{2L^2} \text{ и } \frac{S}{L_0} = 1 + \frac{h^2}{2L_0^2};$$

вычитая из обеих частей равенства по единице, получим:

$$294. \quad \frac{S-L}{L} = \frac{z^2}{2L^2} \text{ и } \frac{S-L_0}{L_0} = \frac{h^2}{2L_0^2}; \text{ так как } \frac{L_0}{L} \approx 1,$$

то напомним:

$$\frac{S-L}{L_0} = \frac{z^2}{2L_0^2} \text{ и } \frac{S-L_0}{L_0} = \frac{h^2}{2L_0^2}.$$

Мы определили относительное растяжение волнистой поверхности независимо от ее упругости, когда она переходит от волнообразного вида с отклонением z в совершенно распрямленное состояние, чего на практике быть не может, так как тогда потребовалась бы продольная сила бесконечного напряжения, которая и разорвала бы поверхность, прежде чем ее растянуть.

Растяжение, соответствующее отклонению h , равно $\frac{h^2}{2L_0^2}$; следовательно, растяжение волны, соответствующее отклонению от h до z , будет равно:

$$295. \quad \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{h^2 - z^2}{2L_0^2},$$

или, деля числителя и знаменателя второй части на h^2 :

$$296. \quad \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right) \cdot \frac{h^2}{L_0^2}.$$

Заметим, что истинное растяжение немного более определяемого этой формулой.

Наименьшие размеры мешка. Применение к разным формам

297. Теперь мы имеем все данные, чтобы определить *наименьшие* размеры металлического мешка с точки зрения его целостности и *упругого* растяжения его волнистой поверхности — при превращении из плоского вида в поверхность вращения.

Для всякого аэростата относительное растяжение листа, как мы видели, выражается приблизительно формулой (253):

$$\frac{A_1}{dx} = \frac{-\pi^2}{8} \cdot y \cdot \frac{d^2y}{dx^2}.$$

Это есть наибольшее растяжение по средней линии газоместности (черт. 20); если это растяжение будет *упругое*, то растяжение других листов того же кольца, выше и ниже средней линии (черт. 20), будет и подавно *упруго*; действительно, число волн каждого листа одного кольца постоянно, так что и длина волны для каждого кольца постоянна; высота же волны постепенно уменьшается и у краев кольца обращается в нуль. Понятно после этого, что если растяжение крутых волн средней линии упруго, то растяжение волн менее крутых — тем более. На этом основании я и беру в расчет только наиболее крутые волны средней линии.

Растяжение (черт. 21) обязательно ввиду геометрических свойств складывающейся поверхности. Но, с другой стороны, растяжение волнистой поверхности в зависимости от крутизны $\frac{h}{L}$ волны и ее изгибания $\frac{z}{h}$ определяется уравнением (296).

Поэтому, исключая из уравнений (253) и (296) $\frac{A_1}{dx}$, или, что то же, $\frac{L - L_0}{L_0}$, найдем:

$$298. \quad \frac{-\pi^2}{4} \cdot y \cdot \frac{d^2x}{dx^2} = \left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right) \cdot \frac{h^2}{L_0^2}.$$

Теперь из этого уравнения и (289), исключая $\frac{h}{L}$, получим:

$$299. \quad L^2 = \frac{-9}{16} \pi^2 \cdot y \frac{d^2y}{dx^2} \cdot \frac{\delta^2 \cdot E^2}{\sigma^2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{z}{h}\right)}{\left(1 + \frac{z}{h}\right)}.$$

Отсюда и из (289), исключая L , найдем:

$$300. \quad h = \frac{-3}{8} \pi^2 \cdot y \cdot \frac{d^2y}{dx^2} \cdot \frac{\delta \cdot E}{\left(1 + \frac{z}{h}\right) \cdot \sigma}.$$

* Здесь, как и выше, принят приближенный метод вычислений: $\frac{h}{L_0}$ формулы (298) считается равным $\frac{h}{L}$ формулы (289).

Здесь узнается высота h волны в зависимости от геометрических свойств общей формы аэростата, от вида волнистой поверхности и от упругости последней; но здесь не принимается во внимание поперечное изгибание волнистой поверхности, когда газоместилище раздувается. На этот счет мы имеем формулу (271), которую преобразуем так:

$$301. \quad h = y \cdot \frac{\sigma}{n \cdot E};$$

здесь n есть коэффициент прочности, или число, показывающее, во сколько раз, из соображений надежности, высота h волн на практике принимается меньше их предельной высоты, определяемой формулой (271).

Из двух последних уравнений, исключая h , получим:

$$302. \quad 1 = \frac{-3}{8} \pi^2 \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} \cdot \frac{n \cdot \delta \cdot E^2}{\sigma^2 \cdot \left(1 + \frac{z}{h}\right)}.$$

303. Например, для *параболического* аэростата найдем: $\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{-2y_1}{x_1^2}$. Следовательно, исключая из уравнения (302) вторую производную, получим:

$$y_1 = \pi^2 \left(\frac{y_1}{x_1}\right)^2 \cdot \frac{n \cdot \delta \cdot E^2}{\sigma^2 \left(1 + \frac{z}{h}\right)}.$$

304. Отсюда видно, что радиус y_1 наибольшего поперечного сечения оболочки прямо пропорционален толщине оболочки δ , желаемой прочности ее (в отношении перелома волнистой поверхности) и обратно пропорционален квадрату предельной упругой растяжимости $\frac{\sigma^2}{E^2}$.

Этот радиус y_1 обратно пропорционален квадрату продолговатости $\frac{x_1^2}{y_1^2}$ оболочки и величине $1 + \frac{z}{h}$.

305. Отсюда видно, что высота $2y_1$ оболочки может быть произвольно мала, если продолговатость будет достаточно велика; толщина δ оболочки и другие величины, входящие в формулу, могут быть при этом произвольно велики или малы.

306. Также размеры $2y_1$ оболочки могут быть в желаемой степени малы и при малой продолговатости $\frac{x_1}{y_1}$, если только толщина оболочки будет достаточно мала.

307. Упругая предельная растяжимость $\frac{\sigma}{E}$ зависит от материала, взятого для устройства оболочки.

Так *, для сварочного или литого железа можно принять в среднем $\frac{\sigma}{E} = \frac{1}{1000}$.

Для тянутого неотожженного (например для проволоки) железа $\frac{\sigma}{E} = \frac{1}{500}$; для отожженного же тянутого железа $\frac{\sigma}{E} = \frac{1}{1000}$, т. е. как и для сварочного и литого железа; для самой лучшей закаленной стали $\frac{\sigma}{E} \leq \frac{1}{250}$; для прокатной красной меди и бронзы в листах в среднем составляет около $\frac{1}{3000}$.

Но есть сорт прокованной бронзы, для которой

$$\frac{1}{400} \leq \frac{\sigma}{E} \leq \frac{1}{300}.$$

308. Положим в уравнении (303):

$$\frac{y_1}{x_1} = \frac{1}{7}; \quad \delta = \frac{1}{7} \text{ мм}; \quad n = 1; \quad \frac{\sigma}{E} = \frac{1}{500}; \quad \frac{z}{h} = \frac{1}{3};$$

тогда вычислим $y_1 = 4 \text{ м}$, т. е. вертикальный диаметр этого металлического упругого мешка, складывающегося в плоскость, будет менее 8 м. Если бы мы употребили материал вдвое толще, то и высота оболочки была бы вдвое больше, именно 16 м. Если бы все данные (308) оставили без изменения, но высоту оболочки $2y_1$ увеличили бы, например, в 3 раза, то и n увеличилось бы во столько же раз.

309. Высоту h волн узнаем по уравнению (271): $h = \frac{y \cdot \sigma}{n \cdot E}$.

Так, для данных (308) найдем $h = 8 \text{ мм}$, т. е. $2h = 16 \text{ мм}$.

Из этого и (289) уравнений, исключая h , найдем длину волны L :

$$L = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{y}{n} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \delta};$$

310. Для данных (308) и для $y = 4 \text{ м}$ вычислим $L = 23,9 \text{ мм}$, или $2L$ около 48 мм; отношение $\frac{L}{h} = 3$. В других сечениях того же мешка h и L будут меньше.

311. Надо иметь в виду, что вычисляемая по этим формулам высота h довольно надежна; действительно, по мере изгибания стенок оболочки и расправления волн истинная высота их все более и более уменьшается, так же как и опасность излома или образования неправильных складок; затем истинная высота волн уменьшается с удалением их от средней линии и с приближением к продольным массивным полосам (черт. 1).

* По Баху.

312. Если мы возьмем на оболочку более толстый и менее упругий материал, например мягкое отожженное железо,— и толщину в $\frac{2}{7}$ мм, то размеры упругого мешка будут гораздо больше, а именно, — вычисляя по формуле (303), для параболического аэростата $y_1 = 32$ м, или $2y_1 = 64$ м.

313. Но из этого еще не следует, что из такого мало упругого ($\frac{\sigma}{E} = \frac{1}{1000}$) металла нельзя делать малых аэростатов.

В самом деле, при раздувании аэростата волны могут сперва растягиваться *неупруго*. При изменениях же объема оболочки после наполнения ее газом и малой упругости будет вполне достаточно.

314. В таком случае мы можем воспользоваться уравнением (298), из которого находим геометрически независимо от упругости материала:

$$\frac{h}{L_0} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{-d^2y}{dx^2} \cdot \frac{y}{\left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right)}}.$$

315. Так, для параболического мешка отсюда найдем:

$$\frac{h}{L_0} = \pi \cdot \frac{y_1}{x_1} \cdot \sqrt{\frac{y}{2y_1 \left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right)}}.$$

316. Тут h можем определить из опыта или по формуле (271):

$$h = y \cdot \frac{\sigma}{n \cdot E}.$$

Для каждого сечения, конечно, h будет различно. Положим например, что мы строим оболочку, размер которой в высоту в округленном состоянии должен быть 25 м; далее, положим:

$n = 1$, $\frac{\sigma}{E} = \frac{1}{1000}$ (мягкое железо), $y_1 = 12\frac{1}{2}$; тогда вычислим $h = 12\frac{1}{2}$ мм.

Теперь положим для среднего сечения в формуле (315): $y = y_1$, $\frac{y_1}{x_1} = \frac{1}{7}$, $\frac{z}{h} = \frac{1}{3}$; найдем $\frac{L}{h} = 3,341$. Стало быть, длина L волны будет в $3\frac{1}{3}$ раза больше высоты h . Так же вычислим наибольшую высоту волн и в других нормальных сечениях мешка.

317. Ввиду того что на практике волнам гофрированной поверхности придется придавать вид простейший, без наведения волн второго порядка, формулой (271) не всегда можно пользоваться; а всего лучше по данным гофрированным поверхностям, построенным из разного материала и из волн разной величины и формы, путем опыта, определить безопасный радиус их наибольшего искривления.

318. До сих пор наши общие формулы (302) мы применяли только к параболическому аэростату.

Для эллиптического мешка

$$y = y_1 \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}$$

и потому

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{-y_1^4}{x_1^2 \cdot y^3}.$$

Следовательно, исключая производную из уравнения (302), получим:

$$319. \quad y_1 = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot \left(\frac{3}{x_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{y_1}{y}\right)^3 \cdot \frac{n \cdot \delta \cdot E^2}{\left(1 + \frac{z}{h}\right) \cdot \sigma}.$$

Отсюда видно, что радиус среднего сечения y_1 зависит от y , именно — размер оболочки для эллиптического аэростата обратно пропорционален y^3 , или кубу радиуса наименьшего сечения мешка, в том месте, где кончаются волны и начинается гладкая коническая поверхность.

320. Так, при условиях (308) и полагая $\frac{y_1}{y} = 3$, вычислим

$y_1 = 54$ м, а при $\frac{y_1}{y} = 2$ $y_1 = 16$ м.

Размеры чересчур громадны. Поэтому эллиптический аэростат не может считаться практичным.

В параболическом аэростате складки и волны уменьшаются пропорционально уменьшению радиуса сечения; поэтому, раз волны изгибаются без полома в средней части, они также хорошо изгибаются и в узких концевых частях гофрированной поверхности. В эллиптическом же аэростате промежутки или волны быстро возрастают к краям и потому безопасное изгибание средних частей оболочки не обуславливает безопасное изгибание ее в узких частях, но наоборот. Вследствие этого расчет (319) делается на крайнее сечение, а не на среднее.

321. Для поверхности вращения, среднее продольное сечение которой выражается формулой:

$$y = y_1 \cdot \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)^{3/4},$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{-3}{4} \left(\frac{y_1^2}{x_1}\right) \cdot \frac{\left(2 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)}{y \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}}.$$

Следовательно, исключая вторую производную из уравнения (302), получим:

$$322. \quad y_1 = \frac{9}{32} \pi^2 \cdot \left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{y_1}{y} \right) \cdot \frac{\left(2 - \frac{x^2}{x_1^2} \right)}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}} \cdot \frac{n \cdot \delta \cdot E^2}{\left(1 + \frac{z}{h} \right) \cdot \sigma}.$$

Из формулы видно, что и тут радиус среднего y_1 поперечного сечения аэростата увеличивается с уменьшением размера y гладких конических поверхностей, расположенных по концам аэростата. Но это увеличение не так быстро, как у эллиптического аэростата.

323. Полагая условия (308) и принимая, кроме того, $\frac{x}{x_1} = \frac{3}{4}$, найдем по уравнениям (321 и 322):

$$\frac{y_1}{y} = 1,86 \quad \text{и} \quad y_1 = 6,08 \text{ м.}$$

Этот аэростат не будет очень больших размеров, даже и при меньшей величине гладких конусов.

324. Для удлиненной косинусоиды (260)

$$y = y_1 \cos \left(\frac{\pi \cdot x}{2x_1} \right) \quad \text{и} \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{-\pi^2}{4} \cdot \frac{y}{x_1^2}.$$

Поэтому из (302) получим:

$$325. \quad y_1 = \frac{3 \cdot \pi^4}{32} \cdot \left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2 \cdot \frac{y}{y_1} \cdot \frac{n \cdot \delta \cdot E^2}{\left(1 + \frac{z}{h} \right) \cdot \sigma}.$$

Отсюда видно, что размер y_1 оболочки пропорционален y . Расчет надо делать, полагая $y = y_1$. Тогда получим:

$$326. \quad y_1 = \frac{3 \cdot \pi^4}{32} \cdot \left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2 \cdot \frac{n \cdot \delta \cdot E^2}{\left(1 + \frac{z}{h} \right) \cdot \sigma}.$$

Сравнительно с параболическим аэростатом, при одинаковых условиях, размер y_1 этого мешка будет в $\left(\frac{\pi^2}{8} \right)$, или в 1,2337 раза больше, т. е. y будет равно 4,93 м, или около 5 м.

Для определения по y длины и высоты волны не забудем формул (271) и (310). Крутизну волны $\frac{h}{L}$ можем вывести из двух последних формул, именно:

$$327. \quad \frac{h}{L} = \frac{\sigma}{E} \cdot \sqrt{\frac{2y}{3n \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{z}{h} \right)}}.$$

328. Последнее уравнение показывает, что крутизна волны $\frac{h}{L}$ увеличивается с уменьшением размеров y поперечного сечения, или с приближением к концам продолговатого мешка, пропорционально $\sqrt{y}$.

329. Если толщина оболочки δ будет уменьшаться к концам ее пропорционально уменьшению размера y поперечного сечения так, что отношение $\frac{y}{\delta}$ остается постоянным, то, как видно из последней формулы, и крутизна по какой-либо продольной линии мешка, идущей из конца в конец его, тоже остается постоянной.

Высота же волн, как и длина их, уменьшается к концам (271).

330. Если игнорировать свойства материала и брать в расчет только геометрические условия, то для определения крутизны не забудем формулу (314). Так, для параболического аэростата имеем формулу (315), а для эллиптического на основании (314) и (315) вычислим:

$$331. \quad \frac{h}{L_0} = \frac{\pi^2 \cdot y_1^2}{2y \cdot x_1 \sqrt{1 - \frac{z^2}{x^2}}};$$

откуда видно, что крутизна волны $\frac{h}{L_0}$ для эллиптического мешка обратно пропорциональна размеру y сечения; между тем как для параболического — прямо пропорциональна $\sqrt{y}$ (см. 315).

Отсюда видно, как и из общей формулы (314), что закон крутизны $\frac{h}{L_0}$ зависит от формы продолговатого мешка, если растяжение гофрированной поверхности будет только отчасти упругое. В противном случае крутизна $\frac{h}{L}$ не зависит от формы, а только от размера y сечения [см. уравнение (327)].

Растяжение гофрированной поверхности вообще

332. Формулы этой главы могут послужить также вообще для определения величины упругого растяжения гофрированной поверхности и силы этого растяжения.

Так, из формулы (289), обозначая крутизну $\frac{h}{L}$ волн через k получим:

$$333. \quad \frac{z}{h} = 1 - \frac{2L \cdot \sigma}{3k \cdot \delta \cdot E}.$$

Теперь из (296), исключая $\frac{z}{h}$, найдем:

$$334. \quad \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{2L \cdot \sigma}{3\delta \cdot E} \cdot \left(k - \frac{L \cdot \sigma}{3\delta \cdot E} \right).$$

335. Отсюда видно, что упругое растяжение гофрированной плоскости *вообще*, независимо от каких бы то ни было аэроста- тов, увеличивается с увеличением крутизны $\frac{h}{L}$ волн.

Ту же формулу можно представить в виде:

$$\frac{L - L_0}{L_0} = \frac{k^3}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{2L \cdot \sigma}{3\delta} \right)^2 \right].$$

Тогда становится ясно, что относительное, упругое и наибольшее удлинение *увеличивается*: с уменьшением толщины δ поверхности, увеличением длины волн L и растяжимости $\frac{\sigma}{E}$ материала. При неизменном отношении $\frac{L}{\delta}$ длины волны к толщине поверхности относительное растяжение остается неизменным.

336. Если, например, $L = 20$ мм, $\delta = 1/7$ мм, $\frac{\sigma}{E} = \frac{1}{500}$, $k = \frac{1}{3}$, то по (334) вычислим $\frac{L - L_0}{L_0} = 0,0448$, т. е. около $1/22$.

337. Необходимо также знать и величину H натяжения растянутой гофрированной поверхности; для этого может послужить уравнение (288). Исключая из него отношение $\frac{h}{z}$ посредством формулы (333), получим:

$$H_{\max} = \frac{\delta \cdot \left(\frac{\delta}{L} \right) \cdot E}{\sigma \cdot k \cdot \left(\frac{E}{\sigma} \right) - \frac{4}{\left(\frac{\delta}{L} \right)}}.$$

Отсюда видно, что величина натяжения пропорциональна упругости материала E и толщине его. Но она уменьшается с увеличением отношения $\frac{E}{\sigma}$ и крутизны волн. Формула показывает наибольшее натяжение при достижении предела упругости σ .

338. Положим, например, $\delta = \frac{1}{7}$ мм $= \frac{1}{70}$ см, $L = 20$ мм $= 2$ см, $\frac{E}{\sigma} = 500$, $k = \frac{1}{3}$, $E = 2 \cdot 10^6$ кг/см².

Тогда, согласно последней формуле, найдем силу упругого предельного растяжения гофрированной поверхности, шириной в 1 см: $H = 0,46$ кг.

339. Можно также показать зависимость между силой H растяжения и соответственным относительным удлинением ds гоф-

пированной поверхности. Из (296) найдем, обозначая для краткости $\frac{L-L_0}{L_0}$ через ds :

$$\frac{h}{z} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2\left(\frac{L_0}{h}\right)^2 \cdot ds}}.$$

Исключая теперь из (288) $\frac{h}{z}$, получим:

$$H = \frac{\partial^3 \cdot E}{4 \cdot I^2} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1 - 2\left(\frac{L_0}{h}\right)^2 \cdot ds}} - 1 \right].$$

Тут только видно, что с возрастанием удлинения ds и сила H , потребная для этого, возрастает.

340. Но мы можем упростить последнюю формулу. Действительно, если волны довольно круты, то выражение $2\left(\frac{L_0}{h}\right)^2 \cdot ds$ составляет небольшую долю единицы, и потому можем написать:

$$\sqrt{1 - 2\left(\frac{L_0}{h}\right)^2 \cdot ds} = 1 - \left(\frac{L_0}{h}\right)^2 \cdot ds.$$

Упрощая на этом основании формулу, получим:

$$H = \frac{\partial^3 \cdot E}{4 \cdot I^2} \cdot \frac{\left(\frac{L_0}{h}\right)^2 \cdot ds}{1 - \left(\frac{L_0}{h}\right)^2 \cdot ds},$$

или, опять-таки приблизительно и на прежнем основании отбрасывая сравнительно незначительный отрицательный член в знаменателе, получим:

$$H = \frac{\partial^3 \cdot E}{4 \cdot h^2} \cdot ds.$$

341. Следовательно, силу растяжения можем принять *приблизительно* пропорциональной удлинению волнистой поверхности ds . Не забудем, что последняя формула применяется, когда ds весьма мало в сравнении с предельным растяжением. Значит, только в самом начале сила растяжения пропорциональна ds , а затем она возрастает гораздо быстрее ds .

Так, для предельного растяжения, полагая $E = 2 \cdot 10^6$ кг/см², $L = 2$ см, $k = \frac{1}{3}$ и $h = \frac{2}{3}$, $ds = \frac{1}{22}$, $\partial = \frac{1}{70}$ см, найдем по упрощенной формуле $H = 0,15$ кг; а на самом деле, $H = 0,49$ кг (см. 338).

Поэтому, когда ds близко к упругому пределу, надо брать формулу (339).

Применение формул к прямым волнам. Разные системы складывающихся и свертывающихся металлических мешков

342. Из этой и гл. V видно, что гофрированная поверхность оболочки аэростата может иметь в плоском состоянии два вида: с прямыми волнами (гл. V), гребни которых идут перпендикулярно главной продольной оси мешка (черт. 5), и с кривыми волнами (черт. 20). Вычисления гл. VII относятся к этому последнему—второму виду металлического мешка.

Построение оболочки первого вида, с прямыми волнами, несравненно проще и потому может быть более рекомендовано для аэростатов, в особенности же больших размеров, хотя и этот вид оболочки, возможно, имеет какие-либо недостатки.

Формулы гл. VII одинаково применимы и для построения складывающегося металлического мешка с прямыми волнами (черт. 5). Только некоторые формулы тогда оказываются излишними, каковы—(233), (234) и (236). Но они, конечно, необходимы для вывода прочих уравнений, без которых невозможно исследование условий построения металлической оболочки аэростата.

Наши формулы также применимы и при построении управляемого аэростата из мягкой оболочки. Принимая, например, простейшую конструкцию (черт. 5) продолговатого мешка, мы пользуемся уравнениями (240) и (241) для определения величины складок между полосами материи (черт. 2). Сшив на плоскости такой мешок с надлежащими складками [можно пользоваться и формулой (253)], мы найдем, что по раздутии и принятии формы поверхности вращения складки разглаждаются.

343. Но не надо забывать, что формулы наши еще требуют поправки, ибо поперечное сечение оболочки не окружность, как мы предполагали, а другая—более сложная кривая (черт. 1 и 15), вид которой зависит отчасти и от величины продольного натяжения гофрированной поверхности; только при полном отсутствии этого натяжения или при идеальной правильности его—эта форма такова, как мы определили в гл. VI.

344. Металлическую оболочку аэростата можно строить и из немногих гладких полос (черт. 2), без гофрировки их, например, из 10 или менее частей. Но части эти должны соединяться мягкими складками (прорезиненным полотном или чем-нибудь подобным), которые разглаживаются, когда продолговатый мешок наполняется газом и сечение его более или менее приближается к форме круга или некоторой другой определенной форме. Гладкие металлические поверхности могут заходить одна за другую и, таким образом, прикрывать и предохранять складки от повреждения.

В некоторых случаях, например для моделей и для первых опытов, такая конструкция оболочки может найти применение. Аэростат тогда будет немного напоминать насекомое, покрытое кольцами, входящими отчасти одно в другое. И тут наши фор-

мулы необходимы для вычисления формы и величины мягких складок *.

345. Опыт с моделями показывает, что оболочку хорошей формы, — в отношении легкого рассеечения воздуха, — можно строить даже только из двух *гладких* поверхностей двойной кривизны, соединенных в среднем поперечном сечении *одной складкой*, прикрытой металлом. Аэростат будет иметь приблизительно ту же форму и те же свойства, как и устроенный из гофрированной поверхности.

346. Наконец мои вычисления и опыты с моделями показывают даже возможность устройства гладкого аэростата совсем без складок. Но форма его поперечных сечений *несколько* отклоняется от формы, вычисленной в гл. VI и изображенной на черт. 1, 13 и 15. Такие аэростаты возможны при условии незначительного изменения объема, примерно на $\frac{1}{10}$ его величины.

Оболочки двух последних категорий, помимо сказанного, имеют еще то неудобство, что не могут складываться в плоскость, а потому представляют большие трудности при построении и наполнении их водородом.

VIII. Форма главного продольного сечения оболочки и его свойства. Поверхность оболочки и объем ее.

Момент веса оболочки и момент подъемной силы газа

Выбор формы продольного сечения оболочки

347. Форма поперечного сечения аэростата определяется, помимо нашей воли, естественными условиями: давлением газов, силой тяжести, степенью продольной растяжимости гофрированной поверхности. Хотя эти условия в наших руках, но все же сечение оболочки сохраняет в общем свою характерную форму (черт. 1 и 15) и при некотором искусственном изменении этих условий.

Напротив, форма поперечного сечения водных судов более зависит от строителя. Обыкновенно она ограничивается кривой, заключенной приблизительно между полукругом и охватывающим его прямоугольником, и выражается уравнением параболической кривой:

$$348. \quad y = y_1 \left(1 - \frac{x^m}{x_1^m} \right).$$

Тут x_1 есть горизонтальная полудлина сечения, а y_1 — его высота (черт. 29).

Чем больше m , тем ближе сечение к прямоугольнику; при $m=1$ сечение обращается в треугольник. Понятно, что $m > 1$.

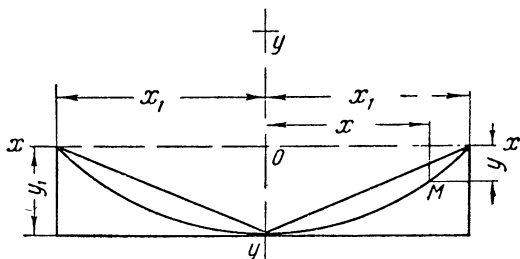
* Этот аэростат был одобрен проф. Жуковским и иностранными специалистами; патентован во всех странах, но я от него первый отказался, как от несовершенного.

Прим. автора.

Мало того, m — число довольно большое, для того чтобы сечение, более или менее закругленное, было ближе к прямоугольнику и чтобы боковая качка была по возможности меньше, а метациентр выше. Устойчивость судна требует такой формы, так как устойчивость тем больше, чем выше лежит метациентр и ниже центр тяжести.

349. У нас боковая качка (черт. 1) ослабляется огромной вдавленной поверхностью сверху оболочки и ладьей — как бы килем. Кроме того, низкое положение центра тяжести воздушного корабля и высокое положение поперечного метациентра делают форму поперечного сечения оболочки совершенно удовлетворительной в отношении поперечной устойчивости.

350. Но продольное сечение оболочки аэростата, как и водного судна, может быть весьма разнообразно; у парохода среднее продольное сечение приблизительно выражается той же параболической кривой (348), как и поперечное сечение, но, конечно, отношение $\frac{x_1}{y_1}$ будет гораздо



Черт. 29.

больше, чем для поперечного сечения, у которого оно обыкновенно только немного более единицы, тогда как у продольного сечения достигает 10 и даже более.

У парохода иногда переднюю часть делают более выпуклой, крутой, чем заднюю, подражая рыбам и птицам с целью уменьшения сопротивления воды. Что касается m , то оно берется самых разнообразных величин у разных видов судов; чем больше m как в поперечном, так и в продольном сечении, тем круче кривые и тем больше так называемая *степень полноты сечений и водоизмещения*.

Понятно, что уменьшение m до известной величины уменьшает сопротивление судна и способствует скорости его движения.

351. Теоретические попытки определить форму наименьшего сопротивления и даже опыты, сделанные с этой целью, ни к чему существенному не повели, и при построении кораблей до сих пор руководствуются не тонкими соображениями и вычислениями, а традиционной параболой и ее уравнением, как для продольного (ватер-линия), так и для поперечного (шпангоут) сечения.

352. Форма продольного сечения оболочки аэростата ограничивается не только условием наименьшего сопротивления, но также удобством конструкции оболочки и достаточной продольной устойчивостью корабля.

Чтобы аэростат свободно изменял свой объем и чтобы он мог стрбиться в плоском виде, надо, чтобы он оканчивался ко-

ническими поверхностями. Следовательно, округленные концы оболочки, как у эллипсоида вращения, невозможны для построения в плоском виде. Кроме того, мы видели, что некоторые (гл. VII) формы оболочек требуют больших размеров для устройства металлического мешка, безопасно изменяющегося в объеме.

Это обстоятельство также ограничивает произвол формы.

Но, разумеется, если не стесняться размерами аэростата, можно принять и многие формы, даже эллипсоид, только округленные концы его должны быть заменены касательными к нему коническими поверхностями.

353. Во всех отношениях традиционная парабола, применяемая к парходам, заслуживает внимания и с нашей стороны, как в отношении сопротивления, так и в отношении конструкции. Помимо моих многочисленных и долговременных опытов по сопротивлению воздуха * самый факт применения параболы к строительству водных судов уже говорит в ее пользу в отношении сопротивления.

354. Теперь обратим внимание на конструктивную сторону. Уравнение параболической кривой мы дали ранее:

$$y = y_1 \left(1 - \frac{x^m}{x_1^m} \right).$$

Отсюда

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -m(m-1) \cdot \left(\frac{y_1 x^{m-2}}{x_1^m} \right).$$

Следовательно, на основании уравнения (302) получим:

$$355. \quad y_1 = \frac{3}{8} \pi^2 (m-1) m \left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2 \cdot \frac{n \cdot \delta \cdot E^2}{\sigma^2 \left(1 + \frac{z}{h} \right)} \left(\frac{x}{x_1} \right)^{m-2}.$$

Мы нашли радиус y_1 среднего сечения металлического мешка, упруго складывающегося в плоскость.

Тут могут быть три случая:

$$m = 2, \quad m > 2 \quad \text{и} \quad m < 2.$$

356. В первом случае уравнение параболы будет:

$$y = y_1 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right);$$

Это — обыкновенная парабола, т. е. одно из конических сечений. Крутизну ее назовем средней.

В таком случае в уравнении (355) множитель $\left(\frac{x}{x_1} \right)^{m-2}$ равняется единице. Таким образом размер y_1 аэростата не будет зависеть от x , или от взятого нами наиболее опасного сечения. Все сечения будут одинаково опасны или безопасны.

* См. мои: „Сопротивление воздуха“, „Горизонтальное движение управляемого аэростата“, „Давление воздуха“ и другие работы по сопротивлению.

357. Во втором случае кривая будет круче, т. е. полнота воздухоизмещения больше и тем больше или тем круче, чем больше m . Из уравнения (355) мы видим, что y_1 будет зависеть от x или от того поперечного сечения, где начинаются гладкие конусы. Чем будут последние меньше, а отношение $\frac{x}{x_1}$ больше, тем и размеры y_1 оболочки в высоту будут больше.

Но мы не можем гладкие конусы сделать очень большими. Поэтому отношение $\frac{x}{x_1}$ примерно составляет от $\frac{9}{10}$ до $\frac{4}{5}$ — не менее. При этой величине отношения и нужно брать y_1 .

Таким образом, сравнительно с простой конической параболой, размеры y_1 оболочки будут больше в $\left[\frac{m(m-1)}{2 \cdot 1} \left(\frac{x}{x_1} \right)^{m-2} \right]$ раз, или в $\left[\frac{m(m-1)}{2 \cdot 1} \left(\frac{x}{x_1} \right)^p \right]$ раз, где p есть какое угодно положительное число, равное $(m-2)$.

358. Если, например, $m=3$, а

$$\frac{x}{x_1} = \frac{4}{5}, \text{ то } \frac{m(m-1)}{2 \cdot 1} \left(\frac{x}{x_1} \right)^{m-2} = 2,4,$$

т. е. размеры будут в 2,4 раза больше сравнительно с коническим сечением.

359. В третьем случае, когда $m < 2$, y_1 также будет зависеть от отношения $\left(\frac{x}{x_1} \right)^{m-2}$.

Тогда можно написать:

$$\left(\frac{x}{x_1} \right)^{m-2} = \left(\frac{x}{x_1} \right)^{-p} = \left(\frac{x}{x_1} \right)^{+p},$$

где p есть также какое угодно положительное число, меньшее двух.

Отсюда видно, что размер y_1 возрастает с уменьшением x ; поэтому вычислять y_1 мы должны при наименьшем x .

Но когда $x=0$, то y_1 , по уравнению (355), равняется бесконечности и, следовательно, аэростат в таком случае невозможен.

360. Причину этой невозможности мы сейчас же себе объясним, если обратим внимание на радиус r кривизны параболической кривой. Он равен:

$$361. \quad r = \frac{-1}{m(m-1)} \left(1 + m^2 \frac{y_1^2 \cdot x^{2m-1}}{x_1^{2m}} \right) \cdot \sqrt{\frac{x_1^{2m}}{y_1^2 \cdot y^{2m-4}} + m^2 \cdot x^2}.$$

Если положим тут, что m хотя немного меньше 2, то $m = 2 - p$, где p какое угодно положительное число, меньшее двух. Радиус же r кривизны будет равен:

$$362. \quad r = \frac{-1}{m(m-1)} \left(1 + m^2 \left(\frac{y_1^2 \cdot x^{3-2p}}{x_1^{2m}} \right) \sqrt{\frac{x_1^{2m} \cdot x^{2p}}{y_1^2} + m^2 x^2} \right).$$

При $x=0$, очевидно, и радиус кривизны обращается в нуль, как бы ни было мало p .

Вот эта бесконечно большая кривизна в среднем поперечном сечении металлического мешка и препятствует его построению, хотя кривая на взгляд представляется весьма плавной, в особенности, когда m немного менее двух. Но чем более этот показатель m удаляется от двух и приближается к единице, тем *округленный угол* в средней части мешка становится заметней, и в пределе, когда $m=1$, мешок будет состоять из двух конических поверхностей, сложенных основаниями. Итак, о построении параболической оболочки, когда $m < 2$, и думать нечего.

363. Мы придем к совершенно тем же результатам, если из уравнений (355) исключим абсциссу x посредством уравнения (348) параболической кривой.

Получим:

$$\frac{x}{x_1} = \sqrt[m]{1 - \frac{y}{y_1}}$$

и, следовательно:

$$364. y_1 = \frac{3}{8} \pi^2 (m-1) m \left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2 \cdot \frac{n \cdot \delta \cdot E^2}{\sigma^2 \left(1 + \frac{z}{h} \right)} \cdot \left(1 - \frac{y}{y_1} \right)^{\frac{m-2}{m}}.$$

365. Отношение размеров этого параболического мешка к простому (коническое сечение) равно:

$$\frac{m(m-1)}{1 \cdot 2} \left(1 - \frac{y}{y_1} \right)^{\frac{m-2}{m}}.$$

Отсюда видно, что чем меньше y или радиус основания гладкого конуса, тем больше отношение размеров оболочек; в пределе оно достигает величины $\frac{m(m-1)}{1 \cdot 2}$; например, для кубической параболы получим 3. Но чем больше y , тем меньше отношение; оно обращается в нуль, если радиус гладкого конуса y принять равным размеру среднего сечения y_1 , т. е. когда размер параболического мешка будет бесконечно мал. Это становится понятным, если посмотреть на выражение радиуса кривизны (361), которое обращается в бесконечность для среднего сечения, когда $x=0$. Тут элемент поверхности является цилиндрическим.

Из предыдущего составим следующее резюме о параболической кривой:

а) кривая изменяется от треугольника до прямоугольника (черт. 29); б) построение мешка возможно только тогда, когда m равно или более двух; в) чем степень m выше, тем больших размеров должен быть металлический складывающийся мешок; г) наименьшие размеры его будут при $m=2$, т. е. для кони-

ческого сечения; д) чем больше m , тем круче кривая и тем более она приближается к прямоугольнику (черт. 29); е) при коническом сечении, когда $m=2$, радиус кривизны (361) изменяется весьма мало, увеличиваясь незначительно от середины кривой к концам, что видно из (361), если положить в этой формуле $m=2$. Тогда получим:

$$366. \quad \rho = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + 4 \cdot \frac{y_1^2 \cdot x_1^2}{x_1^4} \right) \cdot \sqrt{\frac{x_1^4}{y_2^2} + 4 x^2}.$$

Отсюда видно, что при увеличении x , т. е. к концу аэростата, радиус кривизны возрастает. Минимум получим при x , равном нулю, а максимум — при $x = x_1$.

367. Следовательно, наибольший радиус кривизны:

$$\rho_{\max} = \left(\frac{x_1^2}{2y_1} + 2y_1 \right) \cdot \sqrt{1 + \frac{4y_1^2}{x_1^2}},$$

а наименьший:

$$\rho_{\min} = \frac{x_1^2}{2y_1}.$$

368. Отношение будет равно:

$$\frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}} = \left(1 + \frac{4y_1^2}{x_1^2} \right) \cdot \sqrt{1 + \frac{4y_1^2}{x_1^2}}.$$

Если, например, продолговатость $\left(\frac{x_1}{y_1} \right)$ аэростата равна 6, то отношение радиусов равно 1,17.

Значит, радиус кривизны только очень немного увеличивается к концам мешка, т. е. кривая очень близка к дуге круга. Чем более будет продолговатость $\left(\frac{x_1}{y_1} \right)$, тем эта близость будет больше.

369. В отношении конструкции мы видим, что возможны кривые: парабола, если степень $m=2$ или больше; эллипс с коническими надбавками на концах; кривая, *средняя* между этими двумя, удлинённая косинусоида.

Возможно, конечно, и множество других кривых.

В отношении сопротивления мои опыты не показали большой разницы даже между такими поверхностями, как у эллипсоида и тела вращения, у которого образующая есть дуга круга. Притом это сопротивление * зависит и от скорости. Так, при малой скорости полезны закругленные концы и более крутая передняя часть (носовая). При большей же скорости эти особенности формы оказались мало полезными. Я заметил только, что продольные сечения тела не должны иметь углов, кроме концевых, и кривые этих сечений должны быть плавны, как, например, дуга круга или параболы.

* Подразумеваются коэффициент сопротивления и одинаковая продолговатость.

370. Предполагая, что металлический мешок имеет форму поверхности вращения, вычислим: радиус кривизны, длину дуги продольного сечения, площади сечений, поверхность, объем, момент веса оболочки и момент подъемной силы газа.

Общие формулы

371. Для этого мы будем пользоваться следующими общими формулами: для радиуса кривизны:

$$\rho = \frac{\left(\frac{ds}{dx}\right)^3}{\frac{d^2y}{dx^2}}.$$

372. Для определения длины дуги (точно):

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \cdot dx.$$

373. Для определения поверхности вращения (точно):

$$F = 2\pi \int y \cdot ds,$$

или приблизительно, если мешок продолговат:

$$F = 2\pi \int y \, dx.$$

374. Разлагая ds в ряд, получим более точные формулы для длины дуги и величины поверхности:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} &= 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 - \frac{1}{8} \left(\frac{dy}{dx}\right)^4 + \\ &+ \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{dy}{dx}\right)^6 - \frac{5}{128} \left(\frac{dy}{dx}\right)^8 + \dots \end{aligned}$$

Если, например, ограничиться тремя членами для дуги s и двумя — для поверхности, то получим:

$$375. \quad s = \int \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 - \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{dy}{dx}\right)^4 \right\} dx.$$

$$376. \quad F = 2\pi \int y \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \right\} dx.$$

Для определения объема тела вращения имеем (точно):

$$377. \quad U = \pi \int y^2 \cdot dx.$$

Площадь продольного сечения равна (точно):

378. $S = 2 \int y \cdot dx$, т. е. она приблизительно в π раз меньше поверхности вращения (373).

379. Моментом тяжести оболочки относительно какой-либо плоскости M я называю произведение из веса элемента этой оболочки на расстояние его x до плоскости M (черт. 30). Сумма этих моментов тяжести оболочки выразится приблизительно интегралом:

$$M_{OB} = \int 2\pi y \cdot q \cdot x \cdot dx = 2\pi q \cdot \int yx dx,$$

где q означает вес единицы поверхности оболочки.

Тяжесть есть одна из сил, способствующих разрушению аэростата. Сумма моментов (для краткости будем говорить иногда: момент тяжести оболочки) является причиной, стремящейся разрушить аэростат. Ей должны противодействовать крепости оболочки и четырех продольных массивных брусьев.

380. Моментом подъемной силы газа относительно любой плоскости M (черт. 30) я называю произведение из подъемной силы элемента газа на расстояние этого элемента до плоскости M . Сумма моментов (или будем говорить просто момент) подъемной силы газа относительно плоскости M , очевидно, выразится точно интегралом:

$$M_{OB} = \int \pi \cdot a \cdot y^2 \cdot x \cdot dx = \pi \cdot a \cdot \int y^2 x dx,$$

где $a = \gamma_B - \gamma_G$, т. е. равняется разности между плотностью воздуха и наполняющего аэростат газа.

381. Момент подъемной силы газа есть также равнодействующая сила, но противоположная моменту тяжести. Есть еще третья разрушающая сила, зависящая от упругости газа; величина ее изменяется в зависимости от степени раздутия оболочки, но о ней поговорим особо.

Применение общих формул к параболе (коническое сечение)

382. Выше даны необходимые для нас формулы. Сейчас сделаем и применение их. Начнем по порядку — с определения длины дуги продольного сечения и т. д. для параболы.

Уравнение ее:

$$y = y_1 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right);$$

первая производная:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{2xy_1}{x_1^2}.$$

Если тут положим $x = x_1$, то получим приблизительно тангенс угла образующей конечного конуса с его осью.

Именно: $\frac{dy}{dx} = \frac{-2y_1}{x_1}$. Стало быть, чем азростат продолговатей, тем угол конуса меньше. По уравнению (375), интегрируя, найдем:

$$383. \quad s = x \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{x^2 y_1^2}{x_1^4} - \frac{2}{5} \cdot \frac{x^4 y_1^4}{x_1^8} \right).$$

Длину всей дуги от нуля до x_1 получим, положив $x = x_1$. Именно:

$$384. \quad s_1 = x_1 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} - \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^4}{x_1^4} \right).$$

Отбрасывая последний член, получим менее точную формулу:

$$s_1 = x_1 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right).$$

Для определения поверхности воспользуемся формулой (376). Интегрируя, найдем:

$$385. \quad F = 2\pi \cdot y_1 x \left[1 + \frac{x^2}{x_1^2} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} - \frac{2}{5} \cdot \frac{x^2 \cdot y_1^2}{x_1^4} - \frac{1}{3} \right) \right].$$

Величину поверхности от нуля до x_1 получим, положив $x = x_1$:

$$386. \quad F_1 = \frac{4}{3} \pi \cdot y_1 x_1 \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right),$$

или менее точно:

$$F_1 = \frac{4}{3} \pi \cdot y_1 \cdot x_1.$$

По предыдущим формулам можем найти длину дуги от конца x_1 до какой-нибудь средней точки x , а также и поверхность; получим: $(s_1 - s)$ и $(F_1 - F)$.

387. Приблизженно найдем:

$$\begin{aligned} s_1 - s &= x \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right) - x \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{x^2 y_1^2}{x_1^4} \right) = \\ &= (x_1 - x) + \frac{2}{3} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right) \end{aligned}$$

и

$$F_1 - F = 2\pi y_1 \cdot \left[\frac{2}{3} x_1 - x \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{x^2}{y_1^2} \right) \right].$$

388. Объем узнаем по формуле (377). Интегрируя, получим точно:

$$U = \pi \cdot y_1^2 x \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{x^2}{x_1^2} + \frac{x^4}{5x_1^4} \right).$$

Это — объем от нуля до x .

При $x = x_1$ получим:

$$389. \quad U_1 = \frac{8}{15} \pi \cdot y_1^2 x_1. \text{ Объем конца от } x \text{ до } x_1 \text{ равен:}$$

$$390. \quad U_1 - U = \pi \cdot y_1^2 \left[\frac{8}{15} x_1 - x \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{x^2}{x_1^2} + \frac{x^4}{5x_1^4} \right) \right].$$

391. Площадь продольного сечения дает формула (278). Интегрируя, найдем *точно*:

$$S = y_1 x \left(1 - \frac{x^2}{3x_1^2} \right).$$

При $x = x_1$ получим:

$$392. \quad S_1 = \frac{2}{3} y_1 x_1; \text{ разница площадей равна:}$$

$$393. \quad S_1 - S = y_1 \left[\frac{2}{3} x_1 - x \left(1 - \frac{x^2}{3x_1^2} \right) \right].$$

394. Для определения момента тяжести оболочки имеем формулу (379).

Интегрируя, вычислим момент оболочки относительно среднего поперечного сечения M от x до x_1 (черт. 30):

$$M_{OB} = \frac{\pi}{2} \cdot q \cdot y_1 x_1^2 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right)^2.$$

Формула (379) только приближительна. Точная будет:

$$M_{OB} = 2\pi \cdot q \cdot \int y \cdot x \cdot \frac{ds}{dx} \cdot dx.$$

Но так как ввиду продолговатости мешка ds мало отличается от dx и притом не требуется большой точности в определении момента сил тяжести, то мы будем пользоваться формулой (379).

395. Если в уравнении (394) положим $x = 0$, то получим момент от нуля до x_1 .

$$M_{OB_1} = \frac{\pi}{2} \cdot q \cdot y_1 \cdot x_1^2.$$

396. Нетрудно рассчитать и момент оболочки относительно плоскости N (черт. 30) от x до x_1 . Именно:

$$M_{OFN} = \frac{\pi}{2} q \cdot y_1 \cdot x_1^2 \left(1 - \frac{8}{3} \cdot \frac{x}{x_1} + 2 \cdot \frac{x^2}{x_1^2} - \frac{x^4}{3 \cdot x_1^4} \right).$$

397. Для определения момента подъемной силы газа имеем точную формулу (380). Интегрируя, найдем момент газа от нуля до x :

$$M_G = \frac{\pi}{6} \cdot a \cdot x_1^2 \cdot y_1^2 \left[1 - \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right)^3 \right] = \\ = \frac{\pi}{2} \cdot a \cdot x^2 \cdot y_1^2 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} + \frac{x^4}{3x_1^4} \right).$$

398. Если положим тут $x = x_1$, то получим полный момент газа от нуля до x_1 . Именно:

$$M_{G_1} = \frac{\pi}{6} \cdot a \cdot x_1^2 \cdot y_1^2.$$

399. Момент газа относительно плоскости N (черт. 38) от x до x_1 будет:

$$M_{G_N} = \pi \cdot a \cdot y_1^2 \left\{ \frac{1}{6} \cdot x_1^2 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right)^3 - x \left[\frac{8}{15} x_1 - x \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{x^2}{x_1^2} + \frac{x^4}{5x_1^4} \right) \right] \right\}.$$

Не забудем, что в этих формулах a означает разность между плотностью воздуха и наполняющего аэростат газа (удельная подъемная сила газа).

Радиус кривизны для разных кривых

400. Мы видели, как плавно и мало изменяется радиус кривизны дуги конического сечения (368). Мы видели также, что радиус кривизны других парабол изменяется весьма сильно. Именно: от нуля до некоторой определенной величины, если $m < 2$ и построение мешка невозможно, — и от бесконечности до некоторой определенной величины, если $m > 2$ (361—365).

401. Уравнение эллипса относительно осей будет:

$$y = y_1 \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}.$$

Следовательно:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-xy_1}{x_1^2 \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}} = -\frac{x}{y} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \quad \text{и} \quad \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{-y_1^4}{x_1^2 y^3}.$$

403. Радиус же кривизны, по этим данным и по (371), найдем:

$$\rho = \frac{\left[x_1^4 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right) + x^2 \cdot y_1^2 \right]^{2/3}}{x_1^2 \cdot y_1 \left[x^2 + x_1^2 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right) \right]} = \frac{y_1^2 \left(\frac{x_1^2}{y_1^2} \cdot \frac{y^2}{y_1^2} + \frac{x^2}{x_1^2} \right)^{3/2}}{x_1^2 \cdot y_1 \left[x^2 + x_1^2 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right) \right]}.$$

403. Если, например, $x=0$, то $\rho_0 = \frac{x_1}{y_1} \cdot x_1$. Если же $x=x_1$,

то $\rho_1 = \frac{y_1}{x_1} \cdot y_1$. Отсюда наибольшее отношение радиусов равно:

$\frac{\rho_0}{\rho_1} = \left(\frac{x_1}{y_1}\right)^3$. Из этой формулы видно, как сильно изменяется радиус кривизны у эллипса. Например, при продолговатости мешка в 6, т. е. при $\frac{x_1}{y_1} = 6$, наибольший радиус больше наименьшего в 216 раз. Между тем как у параболы (при $m=2$) то же отношение было лишь немногим больше единицы (368).

404. У кривой, которую мы называем *средней* между эллипсом и параболой:

$$\begin{aligned} y &= y_1 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)^{3/4}; & \frac{dy}{dx} &= \frac{-3 \cdot xy_1}{2x_1^2 \sqrt[4]{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}} = \\ & & &= -\frac{3}{2} \cdot \frac{xy_1}{x_1^2} \cdot \sqrt[3]{\frac{y_1}{y}}; & \frac{d^2y}{dx^2} &= -\frac{3}{4} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \cdot \frac{\left(2 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)}{y \sqrt[4]{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}}. \end{aligned}$$

405. Следовательно:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\left[1 + \frac{9}{4} \cdot \frac{x^2 \cdot y_1^2}{x_1^4} \cdot \left(\frac{y_1}{y}\right)^{2/3}\right]^{3/2}}{-\frac{3}{4} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \cdot \frac{2 - \frac{x^2}{x_1^2}}{y \sqrt[4]{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}}} = \\ &= -\frac{4x_1^2}{3y_1} \cdot \frac{\sqrt[4]{1 - \frac{x^2}{x_1^2}} \left(\frac{9}{4} \cdot \frac{x^2 \cdot y_1^2}{x_1^4} + \sqrt[4]{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}\right)^{3/4}}{2 - \frac{x^2}{x_1^2}}. \end{aligned}$$

Если $x=0$, то $\rho_0 = \frac{-2x_1^2}{3 \cdot y_1}$. Если $x=x_1$, то $\rho_1 = 0$.

Если x стремится к нулю, то, принимая $\sqrt[4]{1 - \frac{x^2}{x_1^2}} = 1 - \frac{x^2}{2x_1^2}$,

имеем:

$$\begin{aligned} \rho_{x \rightarrow 0} &= -\frac{4x_1^2}{3y_1} \cdot \frac{\left(1 - \frac{x^2}{2x_1^2}\right) \cdot \left(\frac{9}{4} \cdot \frac{x^2 \cdot y_1^2}{x_1^4} + 1 - \frac{x^2}{2x_1^2}\right)^{3/2}}{2 \left(1 - \frac{x^2}{2x_1^2}\right)} = \\ &= -\frac{2x_1^2}{3y_1} \cdot \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{9}{4} \cdot \frac{x^2 \cdot y_1^2}{x_1^4} + \frac{x^2}{2x_1^2}\right)\right]. \end{aligned}$$

Отсюда (для сильно продолговатых аэростатов) получим приближенную формулу: $\rho_{x \rightarrow 0} = -\frac{2x_1^2}{3y_1} \cdot \left(1 - \frac{3x^2}{4x_1^2}\right)$. В пределе из этой формулы (как и выше) получим при $x=0$:

$$\rho_0 = -\frac{2x^2}{3y_1}.$$

Если x стремится к x_1 , то

$$\rho_{x \rightarrow x_1} = -\frac{4x_1^2}{3y_1} \frac{\sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}} \cdot \left(\frac{9}{4} \cdot \frac{x^2 \cdot y_1^2}{x_1^4}\right)^{3/2}}{2-1} = -\frac{9}{4} \cdot \frac{x^3 \cdot y_1^2}{x_1^4} \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}.$$

При $x=x_1$ получим $\rho_1=0$, но концы мешка закруглены, потому что первая производная обращается в бесконечность при $x=x_1$. Итак, у средней кривой радиус кривизны непрерывно уменьшается от середины к концам, доходя даже до нуля.

406. Удлиненная косинусоида выражается уравнением:

$$y = y_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi x}{2x_1}\right).$$

Отсюда получаем:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{\pi \cdot y_1}{2x_1} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{2x_1}\right); \quad \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{\pi^2 y_1}{4 \cdot x_1^2} \cos\left(\frac{\pi x}{2x_1}\right);$$

$$\rho = \frac{\left[4x_1^2 + \pi y_1^2 \sin\left(\frac{\pi x}{2x_1}\right)\right]^{3/2}}{2\pi^2 x_1 y_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{2x_1}\right)}.$$

407. Если $x=0$, то $\rho_0 = \frac{-4}{\pi^2} \cdot \frac{x_1^2}{y_1}.$

При $x=x_1$ $\rho_1=\infty$, так что концы кривой почти прямые и это весьма выгодно для нашего аэростата.

408. Резюмируя, найдем, что при $x=0$ радиусы кривизны параболы, эллипса, средней кривой и удлиненной косинусоиды последовательно выражаются:

$$\frac{1}{2}, \quad 1, \quad \frac{2}{3}, \quad \frac{4}{\pi^2} = 0,405.$$

Множитель $\frac{x_1^2}{y_1}$, для всех одинаковый, мы выпускаем. Наименьший радиус в средней части кривой оказывается у косинусоидной кривой (около $\frac{2}{5}$), наибольший — у эллипса.

На концах кривых радиусы в том же порядке будут:

$$\left(\frac{x_1^2}{2y_1} + 2y_1\right) \sqrt{1 + \frac{4y_1^2}{x_1^2}}; \quad \frac{y_1^2}{x_1}; \quad 0; \quad \infty.$$

Именно, у параболы он изменяется мало, у эллипса — сильно уменьшается у средней кривой, даже обращается в нуль,

а у длинной косинусоиды—обращается в бесконечность. Между тем все поверхности, образованные вращением этих кривых, очень плавны и представляют небольшое различие в отношении сопротивления.

Площадь наибольшего продольного сечения для разных форм

403. Площадь наибольшего *продольного* сечения для параболы (392) получили: $S = \frac{2}{3} y_1 x_1$.

То же для эллипса найдем:

$$S = \frac{y_1}{2} \cdot \left[x \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}} + x_1 \cdot \arcsin \left(\frac{x}{x_1} \right) \right].$$

Если тут $x = x_1$, то получим полную площадь от нуля до x_1 :

$$S_1 = \frac{\pi}{4} \cdot y_1 x_1.$$

410. Отсюда видно, что сечение эллипсоида полнее в $\frac{3\pi}{8}$, или в 1,178 раза.

То же для средней кривой:

$$S = y_1 \int \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right)^{3/4} dx.$$

411. Разлагая в ряд и интегрируя, получим:

$$S = y_1 x \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{x^2}{x_1^2} - \frac{3}{160} \cdot \frac{x^4}{x_1^4} - \frac{1}{179} \frac{x^6}{x_1^6} - \frac{5}{2048} \cdot \frac{x^8}{x_1^8} - \dots \right).$$

Ограничиваясь двумя членами, найдем:

$$S = y_1 x_1 \left(1 - \frac{1}{4} \frac{x^2}{x_1^2} \right).$$

Площадь от нуля до x_1 будет равна $\frac{3}{4} y_1 x_1$, т. е. немного менее, чем у эллипса.

412. Взяв три члена, получим более точно:

$$S = y_1 x \left(1 - \frac{1}{4} \frac{x^2}{x_1^2} - \frac{3}{160} \frac{x^4}{x_1^4} \right),$$

что при $x = x_1$ даст лишь немного менее; именно:

$$S = \frac{117}{160} y_1 x_1 = 0,73125 \cdot y_1 x_1.$$

413. Взяв все вычисленные в (411) члены, найдем 0,723225. У эллипса же вычислим (409) 0,785398, т. е. значительно более.

У удлиненной косинусоиды площадь главного продольного сечения равна:

$$S = \frac{2}{\pi} y_1 x_1 \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{2x_1}\right),$$

что при $x = x_1$ даст $\frac{2}{\pi} \cdot y_1 x_1$.

Эта площадь даже меньше, чем у параболы, в $\frac{\pi}{3}$ раз, или в 1,0472 раза.

Длина дуги главного продольного сечения

414. Длина дуги *параболы* от нуля до x_1 равна (384):

$$s_1 = x_1 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} - \frac{2}{5} \frac{y_1^4}{x_1^4} \right).$$

Например, при $\frac{x_1}{y_1} = 6$ $s_1 = x_1 \cdot 1,01821$.

415. То же для *эллипса*, см. (374):

$$s = \int \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{x^2 y_1^2}{(x_1^2 - x^2) \cdot x_1^2} - \frac{1}{8} \frac{x^4 \cdot y_1^4}{(x_1^2 - x^2)^2 \cdot x_1^4} + \dots \right] dx.$$

416. Интегрировать это выражение нетрудно. Ограничиваясь, например, двумя членами, найдем:

$$s = x + \frac{y_1^2}{4 \cdot x_1} \cdot \ln \left(\frac{x_1 + x}{x_1 - x} \right),$$

или

$$\frac{s}{x} = 1 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2 \cdot \frac{x_1}{x} \cdot \ln \left(\frac{1 + \frac{x}{x_1}}{1 - \frac{x}{x_1}} \right).$$

Уравнение неприменимо, когда $\left(\frac{x}{x_1} \right)$ близко к единице.

Если положить $\frac{x}{x_1} = \frac{3}{4}$, $\frac{y_1}{x_1} = \frac{1}{7}$, то найдем: $\frac{s}{x_1} = 1,01224$.

Есть формулы для определения полной длины окружности эллипса, но нам они не нужны, так как концы эллипсоида вращения все равно должны быть наставлены конусами.

417. Можно также для определения дуги эллипса его уравнение $y = y_1 \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}$ разложить в ряд так:

$$y = y_1 \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{x^2}{x_1^2} - \frac{1}{8} \cdot \frac{x^4}{x_1^4} - \frac{1}{16} \cdot \frac{x^6}{x_1^6} - \frac{5}{128} \cdot \frac{x^8}{x_1^8} - \frac{35}{256} \cdot \frac{x^{10}}{x_1^{10}} - \dots \right).$$

418. К *средней кривой* формула (375) неприменима. Но, разлагая в ряд уравнение *средней кривой*, получим:

$$y = y_1 \left(1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{x^2}{x_1^2} - \frac{3}{32} \cdot \frac{x^4}{x_1^4} - \frac{5}{128} \cdot \frac{x^6}{x_1^6} - \frac{45}{2048} \cdot \frac{x^8}{x_1^8} - \dots \right).$$

Отсюда и из предыдущего уравнения видно, что как эллипс, так и *среднюю* кривую, при отношении $\frac{x}{x_1}$, не очень близком к единице, можно принимать за параболу, а следовательно, и определять сообразно этому длину кривых.

419. Точно длина дуги средней кривой выражается интегралом:

$$s = \int \sqrt{1 + \frac{9x^2 y_1^2}{4 \cdot x_1^4 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)^{1/2}}} \cdot dx.$$

420. Ректификация удлиненной *косинусоиды*, кроме сложности, не представляет никаких затруднений. Действительно, уравнение кривой будет: $y = y_1 \cos \omega$, где $\omega = \frac{\pi \cdot x}{2x_1}$. Здесь $\cos \omega$ не может быть больше единицы.

Первая производная равна:

$$\frac{dy}{dx} = -m \cdot \sin \omega,$$

где

$$m = \frac{\pi y_1}{2 \cdot x_1};$$

m всегда значительно меньше единицы.

Теперь, пользуясь формулой (375), найдем:

$$s = \int \left[1 + \frac{m}{2} \sin^2 \omega - \frac{m^4}{8} \sin^4 \omega + \frac{m^6}{16} \sin^6 \omega - \dots \right] dx.$$

Ограничиваясь для примера двумя членами и интегрируя, получим:

$$s = x + \frac{\pi \cdot y_1^2}{16 \cdot x_1} \left(\frac{\pi \cdot x}{x_1} - \sin \frac{\pi x}{x_1} \right).$$

421. Положив тут $x = x_1$, найдем длину дуги от нуля до x_1 :

$$s_1 = x + \frac{\pi^2}{16} \cdot \frac{y_1^2}{x_1} = x + \frac{\pi^2}{16} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \cdot x_1.$$

Поверхности разных тел вращения

422. Перейдем к поверхностям тел вращения (376).

Для *эллипса* формула (376) дает:

$$F = 2\pi y_1 \int \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{x^2 y_1^2}{x_1^2 \left(1 + \frac{x^2}{x_1^2}\right)}} \cdot dx.$$

Если ввиду продолговатости металлического мешка принять $\frac{ds}{dx} = 1$, то формула (376) обратится в более простую:

$$423. \quad F = 2\pi \int y \, dx = 2\pi y_1 \int \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}} \, dx,$$

что дает:

$$F = \pi y_1 x_1 \left(\frac{x}{x_1} \sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}} + \arcsin \frac{x}{x_1} \right).$$

При $x = x_1$ $F_1 = \frac{\pi^2}{2} \cdot y_1 x_1$; это есть половина поверхности эллипсоида вращения от нуля до x_1 .

424. Но можно найти и точно поверхность эллипсоида. В самом деле, уравнение (423) дает:

$$\begin{aligned} F &= \frac{2\pi y_1}{x_1^2} \int \sqrt{x_1^4 - x^2(x_1^2 - y_1^2)} \, dx = \\ &= \frac{\pi y_1}{\sqrt{x_1^2 - y_1^2}} \cdot \left[\frac{x}{x_1} \cdot \sqrt{1 - \frac{y_1^2}{x_1^2}} \cdot \sqrt{x_1^4 - x^2(x_1^2 - y_1^2)} + \right. \\ &\quad \left. + x_1^2 \cdot \arcsin \left(\frac{x}{x_1} \cdot \sqrt{1 - \frac{y_1^2}{x_1^2}} \right) \right]. \end{aligned}$$

425. При $x = x_1$ получаем:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot y_1 \cdot x_1}{\sqrt{x_1^2 - y_1^2}} \cdot \left[y_1 \sqrt{1 - \frac{y_1^2}{x_1^2}} + x_1 \cdot \arcsin \left(\sqrt{1 - \frac{y_1^2}{x_1^2}} \right) \right].$$

Если эллипс бесконечно продолговат, то $\frac{y_1}{x_1} = 0$ и

$$F_1 = \frac{\pi^2}{2} \cdot y_1 x_1 + \pi \cdot y_1^2.$$

Пренебрегая последним членом как величиной бесконечно малой (сравнительно с первым слагаемым), придем к формуле (423).

426. Поверхность *средней* кривой по (373) приблизительно получим:

$$F = 2\pi y_1 \int \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right)^{3/4} \cdot dx.$$

Разлагая же в ряд и интегрируя, найдем:

$$F = 2\pi y_1 \cdot x \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{x^2}{x_1^2} - \frac{3}{160} \cdot \frac{x^4}{x_1^4} - \frac{5}{896} \cdot \frac{x^6}{x_1^6} - \dots \right).$$

427. При $x = x_1$ найдем поверхность тела вращения от нуля до x_1 . Именно:

$$F_1 = 2\pi \cdot y_1 \cdot x_1 \left(1 - \frac{1}{4} - \frac{3}{160} - \frac{5}{896} - \dots \right),$$

т. е. менее $3/4$ поверхности описанного цилиндра.

428. Более точные результаты получим, если согласно (373) найдем интеграл:

$$F = 2\pi \cdot y_1 \cdot \int \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)^{3/4} \cdot \left[1 + \frac{9x^2 \cdot y_1^2}{4x_1^4 \cdot \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)^{1/2}}\right]^{1/2} \cdot dx =$$

$$= 2\pi y_1 \int \sqrt{\left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)^{3/2} + \frac{9y_1^2}{4x_1^2} \cdot x^2 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)} \cdot dx.$$

429. Для удлинённой косинусоиды получим (приблизительно считая $ds = dx$):

$$F = 4x_1 y_1 \cdot \sin \left(\frac{\pi x}{2x_1} \right).$$

Если $x = x_1$, то

$$F_1 = 4x_1 \cdot y_1.$$

Следовательно, поверхность конца от x до x_1 будет равна:

$$F_1 - F = 4x_1 y_1 \left[1 - \sin \left(\frac{\pi x}{2x_1} \right) \right].$$

430. Точно получим:

$$F = 2\pi y_1 \int \cos \left(\frac{\pi \cdot x}{2x_1} \right) \sqrt{1 + \frac{\pi^2 y_1^2}{4x_1^2} \sin^2 \left(\frac{\pi x}{2x_1} \right)} \cdot dx.$$

Это выражение нетрудно проинтегрировать; именно, найдем:

$$431. \quad F = \pi \cdot y^2 \left\{ \sin \left(\frac{\pi x}{2x_1} \right) \cdot \sqrt{\frac{4x_1^2}{\pi^2 \cdot y_1^2} + \sin^2 \left(\frac{\pi x}{2x_1} \right)} + \right.$$

$$\left. + \frac{4x_1^2}{\pi^2 \cdot y_1^2} \cdot \left\{ \ln \left[\sin \left(\frac{\pi x}{2x_1} \right) + \sqrt{\frac{4x_1^2}{\pi^2 \cdot y_1^2} + \sin^2 \left(\frac{\pi x}{2x_1} \right)} \right] - \ln \left(\frac{2x_1}{\pi y_1} \right) \right\} \right\}.$$

Формулы будут проще, если ввести гиперболические тригонометрические величины (гиперболические функции).

432. При бесконечной продолговатости получим знакомую нам формулу:

$$F_1 = 4x_1 y_1 \quad (\text{см. 429}).$$

Объемы разных тел вращения

433. Объем эллипсоида вращения от нуля до x точно:

$$U = \pi \cdot y_1^2 x \left(1 - \frac{x^2}{3x_1^2} \right).$$

Объем от нуля до x_1 будет:

$$U_1 = \frac{2}{3} \pi y_1^2 x_1.$$

434. Сравнивая с объемом, полученным от вращения *параболы*, найдем, что при таких же x_1 и y_1 объем эллипсоида полнее в $5/4$ или в $1\frac{1}{4}$ раза.

435. Объем *средней* кривой по общей формуле *точно* выражается интегралом:

$$U = \pi y_1^2 \int \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right)^{3/2} dx.$$

Разлагая в ряд и интегрируя, найдем:

$$U = \pi y_1^2 x \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{x^2}{x_1^2} + \frac{3}{40} \frac{x^4}{x_1^4} + \frac{1}{102} \frac{x^6}{x_1^6} + \frac{1}{384} \cdot \frac{x^8}{x_1^8} + \dots \right).$$

436. При $x = x_1$ приблизительно получим, ограничиваясь приведенными членами:

$$U_1 = 0,587 \cdot \pi \cdot y_1^2 x_1.$$

Этот объем полнее *параболического* в 1,103 раза.

437. Объем тела, полученного от вращения удлинённой *косинусоиды*, от нуля до x выражается *точно*:

$$U = \pi \cdot y_1^2 \left[\frac{1}{2} \cdot x - \frac{x_1}{2\pi} \sin \left(\frac{\pi x}{x_1} \right) \right].$$

При $x = x_1$ получим:

$$U_1 = \frac{\pi}{2} \cdot y_1^2 x_1.$$

Этот объем оказывается меньше объема *параболического мешка* в $16/15$ или в $1\frac{1}{15}$ раза.

Момент тяжести оболочек разных форм

438. Момент тяжести оболочки *эллипсоида* *точно* выразится интегралом (379).

$$\begin{aligned} M_{OB} &= \frac{2\pi y_1 q}{x_1^2} \int x \sqrt{x_1^4 - x^2(x_1^2 - y_1^2)} dx = \\ &= \frac{2\pi y_1 \cdot q}{3 \cdot (x_1^2 - y_1^2)} \cdot [x_1^4 - y_1^2 \sqrt{x_1^4 - (x_1^2 - y_1^2) \cdot x^2}]. \end{aligned}$$

439. Если $x = x_1$, то

$$M_{OB_1} = \frac{2}{3} \pi \cdot q \cdot y_1 x_1 \frac{x_1^3 - y_1^3}{x_1^2 - y_1^2} = \frac{2}{3} \pi \cdot q \cdot x_1 \cdot y_1 \cdot \frac{x_1^2 + x_1 y_1 + y_1^2}{x_1 + y_1}.$$

440. Это—момент относительно средней плоскости M (черт. 30). Относительно плоскости N момент найдем на основании уравнений (438) и (439); имеем:

$$q \cdot (F_1 - F)(x + \Delta x) = M_{OB_1} - M_{OB},$$

где Δx означает расстояние центра тяжести поверхности конца $(F_1 - F)$ мешка до плоскости N ; M_{OB_1} — полный момент, а M_{OB} — момент части оболочки от нуля до x .

Из этого уравнения получим:

$$M_{OB_N} = q \cdot (F_1 - F) \Delta x = M_{OB_1} - M_{OB} - q \cdot (F_1 - F) x,$$

т. е. величину момента тяжести конца мешка $(F_1 - F)$ относительно плоскости N (черт. 30).

441. Это уравнение применимо к любой форме. Для эллипсоида найдем такой момент (относительно N):

$$M_{OB} = \frac{2\pi \cdot q \cdot y_1^3}{3(x_1^2 - y_1^2)} \sqrt{x_1^4 - (x_1^2 - y_1^2) \cdot x} - q \cdot (F_1 - F) \cdot x.$$

F_1 и F имеем из (424) и (425).

442. Для *средней* кривой момент тяжести оболочки от нуля до x относительно M будет, *приблизительно* предполагая $ds = dx$:

$$M_{OB} = \frac{4}{7} \pi \cdot q \cdot y_1 \cdot x_1^2 \left[1 - \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right)^{7/4} \right].$$

Полный момент относительно M равен:

$$M_{OB_1} = \frac{4}{7} \pi \cdot q \cdot y_1 \cdot x_1^2.$$

443. Момент конца оболочки $(F_1 - F)$ относительно плоскости N получим по (440) такой:

$$M_{OB_N} = \frac{4}{7} \pi \cdot q \cdot y_1 x_1^2 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right)^{7/4} - q(F_1 - F) \cdot x.$$

$(F_1 - F)$ найдем по (426)—(428).

444. Момент для удлинённой косинусоиды относительно плоскости M равен *приблизительно*:

$$M_{OB} = 2 \pi q \cdot y_1 \cdot \int \cos \left(\frac{\pi x}{2x_1} \right) \cdot x \cdot dx.$$

Интегрируя по частям и определяя постоянное, как обычно, получим:

$$M_{OB} = 4q \cdot y_1 x_1 \left[x \sin \frac{\pi x}{2x_1} - \frac{2x_1}{\pi} \left(1 - \cos \frac{\pi x}{2x_1} \right) \right].$$

445. Если $x = x_1$, то

$$M_{OB_1} = 4q \cdot y_1 \cdot x_1^2 \left(1 - \frac{2}{\pi} \right).$$

Для определения момента тяжести конца оболочки имеем формулы (440) и (429)—(431).

Момент подъемной силы газа для мешков разной формы

446. Для *эллипсоида* найдем *точно* (относительно плоскости M):

$$M_{OB} = \frac{\pi}{2} \cdot a \cdot y_1^2 \cdot x^2 \cdot \left(1 - \frac{x^2}{2x_1^2}\right).$$

Полный момент подъемной силы равен $M_{OB_1} = \frac{\pi}{4} a y_1^2 x_1^2$.

Здесь a — удельная подъемная сила газа, наполняющего мешок.

447. Полный момент M_{Γ} конца ($U_1 - U$) относительно плоскости N получим на основании формулы, аналогичной (440); именно:

$$M_{\Gamma N} = a (U_1 - U) \cdot \Delta x = M_{OB_1} - M_{OB} - a (U_1 - U) \cdot x;$$

Δx , как и выше, — расстояние центра давления газа, наполняющего конец ($U_1 - U$) мешка до плоскости N (черт. 30).

448. Так, для *эллипсоида* найдем *точно* на основании последних формул и формулы (433):

$$\begin{aligned} M_{\Gamma N} &= \frac{\pi}{2} \cdot a \cdot y_1^2 \left[\frac{1}{2} x_1^2 - x^2 \left(1 - \frac{x^2}{2x_1^2}\right) \right] - \pi \cdot a \cdot y_1^2 \left[\frac{2}{3} x_1 \cdot x - x^2 \left(1 - \frac{x^2}{3x_1^2}\right) \right] = \\ &= \pi \cdot a \cdot y_1^2 \left[\frac{x_1^2}{4} - \frac{x^2}{2} \left(1 - \frac{x^2}{2x_1^2}\right) - \frac{2}{3} x_1 \cdot x + x^2 \cdot \left(1 - \frac{x^2}{3x_1^2}\right) \right] = \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot a \cdot y_1^2 \left[x_1 \cdot \left(\frac{x_1}{2} - \frac{4}{3} x \right) + x^2 \left(1 - \frac{x^2}{6x_1^2}\right) \right]. \end{aligned}$$

449. Для *средней* кривой момент подъемной силы газа от нуля до x относительно главного поперечного сечения M будет [см. общие формулы (371)] выражаться *точно*:

$$M_{\Gamma} = \frac{\pi}{5} \cdot a \cdot y_1^2 \cdot x_1^2 \left[1 - \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)^{5/2} \right].$$

Полный момент относительно плоскости M (черт. 30) равен

$$M_{\Gamma_1} = \frac{\pi}{5} \cdot a \cdot y_1^2 x_1^2.$$

450. Полный момент подъемной силы газа относительно плоскости N на основании последних двух формул, общей формулы (447) и формулы (435) найдем *точно*:

$$\begin{aligned} M_{\Gamma N} &= \pi \cdot a \cdot y_1^2 \cdot x_1 \left\{ \frac{x_1}{5} \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)^{5/2} - x \left[\left(1 - \frac{x}{x_1}\right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x^3}{x_1^3}\right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{3}{40} \left(1 - \frac{x^5}{x_1^5}\right) + \frac{1}{102} \left(1 - \frac{x^7}{x_1^7}\right) + \frac{1}{384} \left(1 - \frac{x^9}{x_1^9}\right) + \dots \right] \right\}. \end{aligned}$$

Так как формулу эту придется употреблять только при отношении $\frac{x}{x_1}$ меньшем единицы, то это — ряд, быстро сходящийся, и потому можно ограничиться немногими членами.

451. Для удлиненной косинусоиды момент подъемной силы газа, относительно плоскости M от нуля до x выразится точно:

$$M_{\Gamma} = \frac{\pi}{2} \cdot a \cdot y_1^2 \left\{ x \left[\frac{x_1}{\pi} \sin \left(\frac{\pi x}{x_1} \right) + \frac{x}{2} \right] - \frac{x_1^2}{\pi^2} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi x}{x_1} \right) \right] \right\}.$$

452. При $x = x_1$ получим полный момент относительно M ; именно:

$$M_{\Gamma_1} = \frac{\pi}{4} \cdot a \cdot y_1^2 \cdot x_1^2 \left(1 - \frac{4}{\pi^2} \right).$$

453. Момент относительно N от x до x_1 по известным формулам, как и для других форм, найдем:

$$M_{\Gamma N} = \frac{\pi}{2} \cdot a \cdot y_1^2 \left\{ \frac{x_1^2}{2} - \frac{x_1^2}{\pi^2} \left[1 + \cos \left(\frac{x_1 x}{\pi} \right) \right] - \right. \\ \left. - x x_1 \left[1 + \frac{2}{\pi} \sin \left(\frac{x x_1}{\pi} \right) \right] + \frac{x^2}{2} \right\}.$$

При распределении массы обручей пропорционально поверхности момент их тяжести определяется, как момент поверхности постоянной толщины.

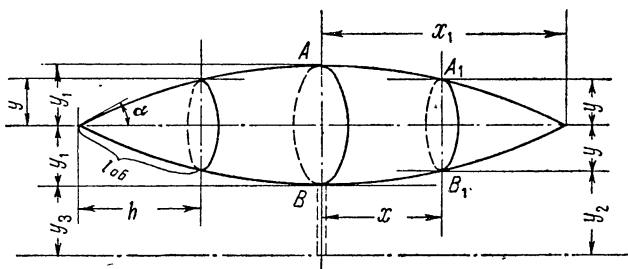
Моменты тяжести и подъемной силы газа выражают некоторые силы, стремящиеся разрушить оболочку аэростата с ее массивными деталями. Момент тяжести мы определили пока только для оболочки постоянной толщины. На самом деле, как оболочка, так и обручи и продольные брусья могут быть переменной толщины, а потому и моменты их надо определять, сообразуясь с этим. Отсюда видно, что вопрос о моменте тяжести не может быть исчерпан в этой главе, так как мы не можем сейчас дать зависимость между толщиной оболочки или какой-либо ее массивной части и местом этой части или ее координатами.

Кроме моментов тяжести и подъемной силы есть еще сила, имеющая огромное влияние на разрушение оболочки, — это упругость наполняющего аэростат газа, или степень напряжения его в низшей точке оболочки (сверхдавление). Это напряжение может бесконечно изменяться, между тем как моменты тяжести и подъемной силы зависят от этого лишь очень незначительно, — по крайней мере, при достаточно сильном напряжении газа. Этим новым вопросом мы и займемся в следующей главе.

IX. Давление газа на площадь поперечного сечения аэростата. Центр этого давления

454. Разность между давлением газа и давлением воздуха в какой-нибудь точке оболочки аэростата я буду для краткости называть просто *давлением газа*. Это давление, очевидно, одно и то же для любой горизонтальной плоскости. Оно зависит от давления в низшей точке B оболочки и от высоты данной точки

оболочки над низшей (черт. 31 и 32). Как и прежде (гл. VI), давление в низшей точке B сечения оболочки мы выразим длиной y_3 газового столба или придатка (аппендикса), наполненного тем же газом, как и внутренность аэростата. Труба эта внизу предполагается открытой.

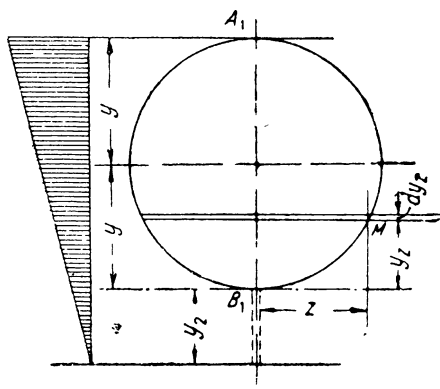


Черт. 31.

455. Давление по направлению продольной оси оболочки, пока она не наклонилась, одно и то же и равно $(y_3 + y_1)$. Давление в низшей точке какого-нибудь сечения будет: $y_2 = (y_3 + y_1 - y)$, где y * есть радиус рассматриваемого сечения. Давление в высшей точке его равно: $(y_3 + y_1 + y)$.

Давление в точке, высота которой относительно низшей точки сечения (черт. 32) равна y_2 , будет:

$$y_2 + y_z = y_3 + y_1 - y + y_z.$$



Черт. 32.

456. Вследствие симметрии давления относительно продольной оси оболочки полное давление P газа на любое поперечное сечение оболочки выразится очень просто, так как среднее давление на сечение можно принять равным

давлению вдоль продольной оси, которое равно $(y_3 + y_1)$.

Итак:

$$P = \pi \cdot a \cdot y^2 (y_3 + y_1).$$

457. Давление на главное поперечное сечение будет:

$$P_1 = \pi \cdot a \cdot y_1^2 (y_3 + y_1).$$

Если положить тут $y_1 = y_3$, то $P_1 = 2\pi \cdot a \cdot y_1^3$.

* Выше у автора через y обозначался не радиус, а ордината сечения.

Если еще тут положим $a = 1,2$ кг, то $P = 7,54 \cdot y_1^3$. Из последних формул видно, что давление на главное поперечное сечение возрастает пропорционально кубу высоты оболочки.

Формула (456) есть общая формула, в которой $y = F(x)$.

458. Давление P распространяется неравномерно на сечение оболочки и на продольные массивные полосы, потому что центр этого давления лежит выше продольной оси; но он тем ближе к ней, чем сечение меньше или ближе к концу оболочки.

Момент этого давления P относительно горизонтальной плоскости A_1 или B_1 для концов аэростата приблизительно выразится: $P \cdot y = \pi \cdot a (y_1 + y_3) \cdot y^3$.

459. Можно точно найти положение центра давления и величину давления для всякого поперечного сечения оболочки (черт. 32). Дифференциал давления газа на поперечное сечение будет:

$$dP = a \cdot (y_2 + y_z) \cdot 2z \cdot dy_z.$$

Согласно уравнению окружности:

$$z = \sqrt{y^2 - (y - y_z)^2}.$$

460. Поэтому давление выразится интегралом:

$$P = 2 \int a \cdot (y_2 + y_z) \cdot \sqrt{y^2 - (y - y_z)^2}.$$

Здесь (455):

$$y_2 = y_3 + y_1 - y.$$

Уравнение надо интегрировать относительно y_z , считая y постоянным.

461. Сделав это и определив постоянное, найдем:

$$P = a \cdot \left\{ \frac{\pi}{2} (y_3 + y_1) y^2 - \frac{2}{3} \sqrt{(2y \cdot y_z - y_z^2)^3} - \right. \\ \left. - (y_3 + y_1) \left[(y - y_z) \sqrt{2y \cdot y_z - y_z^2} + y^2 \arcsin \left(\frac{y - y_z}{x} \right) \right] \right\}.$$

462. Если, например, положим $y_z = 2y$, то получим полное давление; именно:

$$P = \pi \cdot a \cdot (y_3 + y_1) \cdot y^2,$$

т. е. известную формулу (457), которую мы тут строго доказали.

Если $y_z = y$, то

$$P = a \cdot \left[\frac{\pi}{2} (y_3 + y_1) \cdot y^2 - \frac{2}{3} y^3 \right].$$

Положив здесь $y_3 = y = y_1$, найдем P для среднего поперечного сечения оболочки:

$$P = 2a \cdot \pi y_1^3 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3\pi} \right);$$

давление на нижнюю половину сечения будет немного менее половины полного давления.

463. Дифференциал момента M давления относительно горизонтальной плоскости, проходящей через низшую точку B_1 сечения (черт. 32), равен (459):

$$dP \cdot y_z = 2a \cdot y_z \cdot (y_2 + y_z) \sqrt{y^2 - (y - y_z)^2} dy_z.$$

Интегрируя это уравнение относительно y_z и определяя постоянное, получим:

$$\begin{aligned} \int dP \cdot y_z &= M = \\ &= ay \left(y_3 + y_1 + \frac{1}{4} y \right) \left[\frac{\pi}{2} y^2 - (y - y_z) \sqrt{2y \cdot y_z - y_z^2} - y^2 \arcsin \left(1 - \frac{y_z}{y} \right) \right] - \\ &- a \sqrt{(2y \cdot y_z - y_z^2)^3} \left[\frac{2}{3} \left(y_3 + y_1 + y \right) + \frac{1}{2} (y - y_z) \right]. \end{aligned}$$

464. Если $y_z = 2y$, то найдем для полного момента:

$$\int y_z \cdot dP = a \cdot \pi \cdot y^3 (y_3 + y_1 + \frac{1}{4} y).$$

Если еще $y_3 = y = y_1$, то для среднего сечения получим:

$$\int y \cdot dP = 2 \frac{1}{4} \cdot a \cdot \pi \cdot y_1^4.$$

465. Разделив момент M полного давления на величину давления (462), найдем:

$$\frac{M}{P} = y \cdot \left[1 + \frac{y}{4 (y_3 + y_1)} \right],$$

т. е. расстояние центра давления от низшей точки сечения B_1 .

Так как из формулы видно, что это расстояние больше y , то, стало быть, центр лежит всегда выше продольной оси, или выше центра круга. Но из формулы же видно, что чем меньше y , т. е. чем ближе к концу оболочки, тем ближе центр давления к геометрическому центру круга. Из той же формулы видно, что чем больше давление y_3 в низшей точке оболочки и чем больше размеры y_1 оболочки в высоту, тем ближе эти центры.

466. Для среднего сечения в последней формуле надо положить $y = y_1$; тогда получим:

$$\frac{M}{P} = y_1 \cdot \left[1 + \frac{1}{4 \left(\frac{y_3}{y_1} + 1 \right)} \right].$$

* Способ интегрирования, хотя и сложный, не привожу как не содержащий в себе ничего оригинального. Прим. автора.

Отсюда видно, что чем больше отношение $\frac{y_3}{y_1}$ давления в низшей точке оболочки к ее размерам $2y_1$ в высоту, тем ближе к продольной оси лежит центр давления.

467. Положив для примера $y_3 = y_1$, найдем: $\frac{M}{P} = \frac{9}{8} y_1$.

Зная положение центра давления газа, нетрудно определить и давление его на оба продольных массивных бруса, предполагая, что все давление передается только им. Например, в приведенном случае плечи составляющих сил относятся, как $\frac{9}{8} y_1$ к $\frac{7}{8} y_1$.

Отношение плеч, следовательно, будет равно $\frac{9}{7}$. Значит, нижняя составляющая относится к верхней, как 7 к 9. Если $y_3 = 0$, т. е. давление в низшей точке будет нуль, то $\frac{M}{P} = \frac{5}{4} y_1$; следовательно, плечи составляющих сил относятся, как $\frac{5}{4} y_1$ к $\frac{3}{4} y_1$, а силы, — как 3 к 5. Следовательно, верхняя сила будет чуть не в 2 раза ($1\frac{2}{3}$) больше нижней. Понятно, что в других поперечных сечениях отношение составляющих сил ближе к единице.

468. Общая формула отношения составляющих сил есть:

$$\frac{1 + \frac{y}{4(y_3 + y_1)}}{1 - \frac{y}{4(y_3 - y_1)}} = \frac{4\left(\frac{y_3}{y_1} + 1\right) + \frac{y}{y_1}}{4\left(\frac{y_3}{y_1} + 1\right) - \frac{y}{y_1}}.$$

Отношение плеч — обратное.

469. Момент тяжести узкого кольца оболочки, заключенного между двумя близкими и параллельными ее сечениями, равен:

$$2\pi y \cdot q \cdot y_z \cdot ds,$$

где q есть вес единицы поверхности оболочки, а y_z — расстояние сечения до плоскости, относительно которой определяется момент.

Весовой момент других частей азростата, заключенных между теми же параллельными сечениями, обозначим через:

$$P \cdot y_z \cdot dy_z.$$

470. Момент подъемной силы газа в том же сечении будет:

$$a\pi \cdot y^2 \cdot y_z \cdot dy_z.$$

Если грузы и веса на воздушном корабле будут так распределены, что полный момент тяжести *каждого* сечения будет равен моменту подъемной силы газа этого же сечения, то эти обратные по направлению силы друг друга взаимно уничтожат и мы, изучая продольные давления, действующие на оболочку

и массивные брусья, увидим тогда только действие упругости газа, которое нами рассмотрено в этой главе. С моментами же тяжести и подъемной силы газа в таком случае можем не считаться. В средних частях аэростат и может быть так устроен, но не в концах, которые были бы тогда чересчур тонки и нежны, что неисполнимо.

Х. Обзорение главных сил, действующих на оболочку аэростата, и их взаимные отношения

Силы продольные

471. Ввиду волнистого строения оболочки и изменения ее объема и формы сила натяжения ее в продольном направлении как будто весьма изменчива, а потому и прочность не вполне надежна.

Продольные силы, стремящиеся разрушить воздушный корабль, должны восприниматься одними продольными брусьями. Итак, мы пренебрежем при изучении продольных сил ролью оболочки и будем иметь в виду пока лишь четыре продольных бруса (черт. 1 и 6).

На какое-нибудь сечение, например AB (черт. 31), будут действовать следующие главные продольные силы: а) сила тяжести оболочки, которая дает момент *тяжести оболочки*; б) сила тяжести массивных продольных брусьев, обручей (которые можно считать и за одно целое с оболочкой), ладьи, ее машин, людей и грузов, действие силы также выражается моментами их относительно рассматриваемого поперечного сечения; в) подъемная сила газа, действующая в обратном направлении и подробно рассмотренная нами; наконец, г) упругость газа в каждом сечении; эта сила зависит от большего или меньшего наполнения оболочки газом.

472. Первая (сила тяжести) растягивает верхнюю пару брусьев и сжимает с такой же энергией нижнюю; вторая (подъемная сила газа) делает обратное, т. е. сжимает верхние брусья и растягивает нижние; наконец, сила упругости газа все брусья стремится растянуть.

Обозначив моменты трех сил последовательно через M_T , M_G и M_A , найдем, что на верхние брусья будет влиять равнодействующая:

$$\frac{M_T}{2y} - \frac{M_G}{2y} + \frac{M_B}{2y} = \frac{M_T - M_G + M_B}{2y},$$

где y есть радиус сечения, а M_B — момент упругости газа относительно горизонтальной плоскости, проходящей через точку A .

473. Также сила, действующая на нижние брусья, выразится:

$$-\frac{M_T}{2y} + \frac{M_G}{2y} + \frac{M_A}{2y} = \frac{-M_T + M_G + M_A}{2y},$$

где M_A , есть момент давления газа относительно B .

474. Для средних частей оболочки, удаленных от концов ее, момент тяжести может быть равен моменту подъемной силы газа, т. е.

$$M_T = M_G,$$

так что тогда будем иметь дело только с силой упругости газа, растягивающей брусъ. Но это неприменимо к концам оболочки: там момент подъемной силы газа сравнительно с моментом тяжести ничтожен (гл. IX). Действительно, вес конической поверхности, которой оканчивается оболочка, пропорционален квадрату ее линейных размеров, а объем заключенного в ней газа пропорционален кубу тех же размеров. Следовательно, уменьшение подъемной силы с уменьшением поверхности будет совершаться гораздо быстрее, чем уменьшение веса поверхности конуса.

475. Пренебрегая подъемной силой концов оболочки, найдем, что на верхние брусъ будет действовать сила:

$$\frac{-M_T - M_B}{2y},$$

а на нижние — сила:

$$\frac{-M_T - M_A}{2y}.$$

Первая сила всегда положительна и потому она только растягивает брусъ; вторая же может быть и положительна и отрицательна, смотря по обстоятельствам.

Если момент упругости будет больше момента тяжести, то она будет растягивать брусъ, и наоборот, и тогда мягкая или тонкая и непрочная оболочка будет провисать, концы оболочки опадут, образуя неправильные складки.

476. Равнодействующую силу для конических концов оболочки мы можем вывести из предыдущих сложных формул; но проще это сделать самостоятельно, независимо от них (черт. 31, слева).

Давление газа на конус равно, см. (462): $P = \pi \cdot a (y_3 + y_1) y^2$; момент этого давления относительно A или B равен:

$$M_T = \pi \cdot a (y_3 + y_1) y^3,$$

что, впрочем, видно прямо из формулы (464), где величиной $1/4 y$ как сравнительно малой можно пренебречь.

— 477. Вес конической оболочки выразится: $q \cdot \pi \cdot y \cdot l_{OB}$, где l_{OB} — образующая, а y — радиус основания. Момент этой тяжести относительно точки B или A будет:

$$M_T = q \pi \cdot y \cdot l_{OB} \cdot \frac{h}{3}; \text{ но } h = l_{OB} \cdot \cos \alpha \text{ и } y = l_{OB} \cdot \sin \alpha,$$

где α —угол между осью конуса и его образующей. Следовательно:

$$M_T = \pi \cdot a \cdot (y_3 + y_1) l_{OB}^3 \sin^3 \alpha; \quad M_T = \frac{\pi}{3} \cdot q \cdot l_{OB}^3 \sin \alpha \cos \alpha;$$

отношение моментов выразится:

$$\frac{M_T}{M_T} = \frac{3a(y_3 + y_1)}{q \cdot \cos \alpha} \cdot \sin^2 \alpha.$$

478. Отсюда видно, что это отношение тем больше, чем больше давление в нижней точке оболочки y_3 и чем легче коническая поверхность q . Если $y_3 = y_1$, то

$$\frac{M_T}{M_T} = \frac{6a y_1}{q \cdot \cos \alpha} \cdot \sin^2 \alpha.$$

Здесь угол α можно узнать по производной $\frac{dy}{dx}$, ибо

$$\alpha = \arctg \left(\frac{dy}{dx} \right),$$

где $x = x_1$.

При обыкновенных условиях и даже при значительной продолговатости оболочки отношение моментов больше единицы и потому даже концы мягкой оболочки не будут провисать.

479. Формуле (477) мы можем придать вид:

$$\frac{M_T}{M_T} = \frac{3a(y_3 + y_1) \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}{q \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}},$$

приблизительно, при значительной продолговатости:

$$\frac{M_T}{M_T} = \frac{3a}{q} \cdot (y_3 + y_1) \cdot \left(\frac{dy}{dx} \right)^2.$$

480. Мы не обратили пока внимания на вес брусьев ладьи и грузов и на их момент.

Вес этих деталей пропорционален длине, а величина его момента приблизительно пропорциональна квадрату линейных размеров, между тем как момент упругости газа пропорционален кубу тех же размеров конуса; а потому, при достаточно малой величине конуса, момент тяжести превысит момент давления газа и тогда оболочка бы повисла, если бы не ее жесткость или не жесткость продольных брусьев и других возможных массивных частей конических концов оболочки. Итак, в этом случае мы уже можем даже пренебречь упругостью газа, а расчет делать исключительно на сопротивление жестких частей оболочки.

481. Впрочем, если обратить внимание на то, что форма аэростата не только уклоняется от формы поверхности вращения (черт. 1, 2 и 3), но имеет идущую из конца в конец среднюю до-

бавочную часть в виде продолговатого цилиндра (черт. 1, 2), то момент давления газа на концах будет приблизительно пропорционален квадрату линейных размеров сечения, точно так же как и момент тяжести массивных брусьев и пр. Таким образом упругость газов может уравновесить и тяжесть массивных частей при достаточной их легкости и при достаточной ширине воображаемого среднего продольного цилиндра (черт. 2).

482. Применяясь пока к старому моему проекту воздушного корабля на 200 чел. (черт. 1), мы дадим для него несколько чисел, иллюстрирующих силы, стремящиеся разрушить оболочку аэростата.

Предположим для простоты, что груз в каждом поперечном сечении соответствует его подъемной силе; тогда, главным образом, проявит свое влияние упругость газа. Каково же будет его давление на четыре продольных бруса?

Для решения вопроса нам может послужить простая формула (456), в которой положим $y_2 = y_1$. Получим:

$$P = 2 \pi a \cdot y_1 \cdot y^2,$$

или, принимая во внимание уравнение образующей:

$$y = y_1 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right),$$

получим:

$$P = 2 \pi a \cdot y_1^3 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right)^2.$$

Напомним, что y_1 , или радиус главного поперечного сечения, составляет 15 м и что длина аэростата $2x_1 = 210$ м; мы же примем 200 м; положим также, что $a = 0,001$ м/м³ (a — удельная подъемная сила газа в м/м³).

483. Теперь вычислим следующую зависимость между x и y (в м) и P — давлением на четыре продольных бруса (в т):

Таблица 3

x	0	20	40	50	60	70	80	90	100
y	15	14,40	12,60	11,25	9,60	7,65	5,40	2,85	0,00
P	21,07	19,38	14,95	11,80	8,64	5,48	2,74	0,76	0,00

Выходит, что в средней части давление превышает 21 т. Даже на 10 м от конца, где радиус y составляет менее 3 м, давление равно 760 кг.

484. При вычислении этого давления мы принимали круглую форму сечения и не обращали внимания на ширину среднего продольного пояса (черт. 2). Для концов последним в особенности нельзя пренебрегать.

Площадь добавочного прямоугольного сечения (черт. 1 и 2) равна $2y \cdot l$, где l есть ширина сечения; помножив площадь на среднее давление газа на продольной оси $a (y_3 + y_1)$, получим полное прибавочное давление на четыре продольных бруса: $2a \cdot l \cdot (y_3 + y_1) \cdot y$, или, приняв во внимание уравнение образующей:

$$2a \cdot l \cdot y_1 (y_3 + y_1) \cdot \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right).$$

Если тут положим $y_3 = y_1$, то получим:

$$4a \cdot l \cdot y_1^2 \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2} \right) = 4a \cdot l \cdot y_1 \cdot y.$$

485. Так, для $x = 10$ м найдем $y = 2,85$ м, а добавочное давление 171 кг — при ширине l , равной 1 м.

Еще ближе к концу сравнительное значение этого добавочного давления увеличится до полного его преобладания при достаточном приближении к концу.

Все-таки, при устройстве вдоль оболочки от конца до конца галлерей или при помещении каких-либо машин поблизости к концам оболочки, нельзя исключительно полагаться на упругость газов, момент которых в этом случае не может уравновесить момент тяжести. Тогда уже нужно заботиться, чтобы концы оболочки с ее массивными частями выдерживали сжимающее действие момента тяжести. Подробные и точные расчеты сейчас преждевременны; теперь же перейдем к поперечному натяжению по окружности поперечного сечения, или по направлению, перпендикулярному продольной оси аэростата.

Силы поперечные

486. Если аэростат продолговат и продольное натяжение оболочки слабо, то узкую полосу между двумя близкими поперечными сечениями можно считать как бы изолированной (черт. 15).

Мы видели (159), что давление газа на единицу поверхности оболочки равно $a (y + b)$ *. Если, например, хотим узнать давление в высшей точке среднего поперечного сечения, то в формуле положим: $a = 0,001$, $b = y_1 = 15$ м, $y = 2y_1 = 20$ м; тогда найдем: $3a \cdot y_1 = 45$ кг/м² поверхности оболочки.

487. Допуская круглое сечение (черт. 31 и 32), получим для величины поперечного горизонтального давления:

$$\begin{aligned} \int a \cdot (y_2 + y_z) dy_z &= \frac{a}{2} \cdot (y_2 + y_z)^2 - \frac{a}{2} \cdot y_2^2 = \frac{a}{2} (2y_2 \cdot y_z + y_z^2) = \\ &= a \cdot y_z \left(y_2 + \frac{y_z}{2} \right), \end{aligned}$$

где, см. (455):

$$y_2 = y_3 + y_1 - y.$$

* В обозначениях, принятых автором с начала гл. IX.

Следовательно:

$$a \cdot y_z \cdot \left(y_2 + \frac{y_z}{2} \right) = a \cdot y_z \left(y_3 + y_1 - y + \frac{y_z}{2} \right);$$

здесь y — радиус.

488. Для полного давления $y_z = 2y$ и потому оно равно: $2a \cdot y_z (y_3 + y_1)$.

Для среднего сечения $y = y_1$, вследствие чего для него получим: $2a \cdot y_1 (y_3 + y_1)$. Если $y_3 = y_1$, то давление будет равно: $4a \cdot y_1^2$. Ширина сечения предполагается в единицу.

489. Полное давление на главное продольное сечение оболочки выразится средним давлением по оси $a \cdot (y_3 + y_1)$, умноженным на площадь этого сечения (378).

490. Момент поперечного давления газа относительно низшей точки выразится:

$$a \cdot \int (y_2 + y_z) y_z \cdot dy_z = a \cdot \left(\frac{y_2}{2} y_z^2 + \frac{y_z^3}{3} \right).$$

491. Для полного момента давления, полагая $y_z = y$, найдем:

$$2a \cdot y^2 \left(y_2 + \frac{4}{3} y \right),$$

или, так как $y_2 = y_3 + y_1 - y$:

$$2a \cdot y^2 \cdot \left(y_3 + y_1 + \frac{1}{3} y \right).$$

492. Разделив последнее выражение на величину давления (488), получим расстояние центра давления от низшей точки сечения:

$$l = \frac{y \cdot \left(y_3 + y_1 + \frac{1}{3} y \right)}{(y_3 + y_1)}.$$

Отсюда видно, что центр давления несколько выше продольной оси оболочки, но тем ближе к ней, чем меньше y в отношении y_1 , или чем сечение ближе к концам.

493. Для среднего сечения $y = y_1$; положив еще $y_3 = y_1$, найдем, что расстояние центра давления будет $\frac{7}{6} y_1$; следовательно, верхняя составляющая давления будет относиться к нижней, как $\frac{7}{6}$ к $\frac{5}{6}$, или, как 7 к 5.

Высота центра продольных сил при тех же условиях будет $\frac{9}{8} y_1$, т. е. немного ниже $\left(\text{на } \frac{1}{24} y_1 \right)$.

494. Если в последней формуле положим для среднего сечения $y = y_1$ и $y_3 = 0$, то найдем, что центр будет находиться от низшей точки на расстоянии $\frac{4}{3} y_1$, т. е. опять выше, чем центр продольных сил $\left(\frac{5}{4} y_1 \right)$ на $\frac{1}{12} y_1$.

495. Есть возможность более точного исследования поперечных сил, растягивающих полосу поперечного сечения (черт. 15).

Можно вообразить себе, что полоса оболочки скользит (или расположена) на блоках без трения. После этого очевидно, что натяжение ее было бы одинаково по всей длине, если бы она была невесома. Благодаря же весоности натяжение по направлению элемента кривой равно некоторой постоянной величине плюс функция веса ниже расположенной части оболочки. Отсюда ясно, что наименьшее натяжение будет в низшей части оболочки. Это натяжение будет непрерывно возрастать с увеличением высоты элемента кривой и достигнет максимума в высшей точке оболочки, на высоте h .

Нетрудно видеть, что каждый элемент ds оболочки, весящий $q \cdot ds$, прибавляет натяжение на величину $q dy$. Поэтому натяжение оболочки в любой точке выражается интегралом:

$$\int q dy + C = q \cdot y + C, \text{ где } C — \text{постоянное натяжение, когда } y = 0.$$

Отсюда видно, что натяжение двух элементов оболочки, расположенных на одной высоте y , одинаково.

Если бы было известно натяжение C_1 в высшей точке или вообще в какой-нибудь точке, высота которой равна h , то натяжение в какой-нибудь другой низшей точке будет: $C_1 - q(h - y)$.

496. О натяжении в верхнем углублении оболочки (черт. 1), где рукава ее образуют угол 2α , можно судить по величине этого угла и по величине груза, прикрепленного к этому углублению, предполагая части ладьи несвязанными между собой, или достаточно гибкими, или в шарнирном соединении между собой. Чем больше груз и чем больше угол между рукавами оболочки, тем больше и натяжение. Вывести формулу для натяжения C во впадине очень легко:

$$C = \frac{P}{2 \cdot \cos \alpha},$$

где P означает часть груза, приходящегося на данную полосу оболочки.

Итак, натяжение в любой точке выразится:

$$\frac{P}{2 \cdot \cos \alpha} - q(h - y),$$

где h есть высота или ордината вершины угла впадины. Например, для низшей точки $y = 0$ и потому натяжение будет

$$\frac{P}{2 \cos \alpha} - qh. \text{ Так как кривая любого сечения легко вычерчи-}$$

вается (гл. VI), то определение h и a не представляет затруднений, а потому и величину натяжения определить всегда можно.

497*. Мы видели (гл. VI), что натяжение элемента складывается из двух сил, одна из которых горизонтальна, а другая вертикальна. Первая не зависит от тяжести оболочки (162) и выражается интегралом:

$$t_z = \int a \cdot y \cdot dy = \frac{a}{2} \cdot y^2 + C.$$

Если применим последнее уравнение к вертикальному элементу кривой, ордината которой $(h_1 + b)$ (черт. 15), то горизонтальная составляющая t_z тут будет равна нулю и потому получим:

$$t_z = \frac{a}{2} (h_1 + b)^2 + C = 0.$$

Исключая C из предыдущего уравнения, с помощью этого, найдем:

$$t_z = -\frac{a}{2} \left[\left(h_1 + b \right)^2 - y^2 \right].$$

498. Эта формула дает возможность определить *точно* натяжение низшей точки оболочки. Для этого в уравнении положим $y = b$; тогда найдем:

$$t_{\min} = -a \cdot h_1 \left(\frac{h_1}{2} + b \right).$$

Натяжение высшего элемента кривой получим, положив $y = h + b$ (черт. 15):

$$t_{\max} = +\frac{a}{2} \cdot (h - h_1) (h + h_1 + 2b).$$

Разные знаки показывают, что эти натяжения противоположны по направлению.

499. Отношение высшего натяжения к низшему будет:

$$\frac{t_{\max}}{t_{\min}} = -\frac{(h - h_1) (h + h_1 + 2b)}{h_1 (h_1 + 2b)}.$$

Это отношение по предыдущему (495) должно быть всегда более единицы, а потому при $b = 0$

$$\frac{h^2 - h_1^2}{h_1^2} < 1 \text{ и при } b = \infty \quad \frac{h - h_1}{h_1} < 1; \text{ откуда } \frac{h}{h_1} < 2, \text{ или } \frac{h_1}{h} > \frac{1}{2}.$$

500. Уравнение (163) показывает, что, зная производную $\frac{dy}{dz}$ и натяжение t_z по направлению z , всегда можно найти и на-

* В § 497—504 употребляются обозначения, принятые до гл. IX.

тяжение t_y по направлению y . Имея же обе составляющие, нетрудно найти и величину равнодействующей, или натяжение по направлению элемента ds кривой. Оно будет равно:

$$\sqrt{t_z^2 + t_y^2} = t_z \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2} = t_z \cdot \frac{ds}{dz}.$$

501. Производная в этом уравнении определяется формулой (173) или, еще что проще, можем прямо исключить $\frac{ds}{dz}$ с помощью формулы (191).

Постоянные C_1 и C_2 выражены в уравнениях (181) и (182) *. Наконец, t_z узнаем по уравнению (497).

Сделав все указанное, найдем:

$$\frac{ds}{dz} = \frac{2q \cdot (h - 2y) - ah(h + 2b) + 4qb}{2a(y^2 - b^2) - ah \cdot (h + 2b) + 2qh}$$

и

$$t_z \cdot \frac{ds}{dz} = \frac{a[2q(h - 2y) - ah \cdot (h + 2b) + 4qb] \cdot [(y^2 - b^2) - h_1(h_1 + 2b)]}{4a(y^2 - b^2) - 2ah(h + 2b) + 4q \cdot h}.$$

502. Если кривая невесома, то $q = 0$; тогда получим:

$$t_z \cdot \frac{ds}{dz} = \frac{-ah(h + 2b) \cdot [(y^2 - b^2) - h_1(h_1 + 2b)]}{4(y^2 - b^2) - 2h(h + 2b)}.$$

Величина этого выражения ввиду невесомости кривой не должна зависеть от ординаты. Но между h_1 и h существует зависимость (189), которая подтверждает сказанное.

503. Можно проще проверить эти наши формулы. Положим в последнем уравнении и $b = 0$; это значит, что давление в нижней точке оболочки будет нуль.

Тогда получим:

$$t_z \cdot \frac{ds}{dz} = - \frac{a \cdot h^2 (y^2 - h_1^2)}{2(2y^2 - h^2)}.$$

Вспомнив зависимость между h и h_2 , когда q и b равны нулю (189), и исключив h , найдем:

$$t_z \cdot \frac{ds}{dz} = - \frac{ah_1^2}{2},$$

что видно и по формуле (498), если положим в ней $b = 0$.

504. Если, на самом деле, проверить (502), исключая h посредством (189), то получим:

$$t_z \cdot \frac{ds}{dz} = - ah_1 \left(\frac{h_1}{2} + b \right),$$

* Здесь, в уравнения (181) и (182), вместо $y_{\max}$ и $y_{\min}$ подставлены их другие выражения: $y_{\max} = h + b$ и $y_{\min} = b$. Прим. ред.

т. е. формулу (498). Отсюда видим, что в этом случае, т. е. когда кривая невесома ($q = 0$), действительно, натяжение не зависит от y , или что оно постоянно по всей кривой.

XI. Уклонение в деталях металлического воздушного корабля

Общий характер металлического аэростата выяснился из моих предыдущих трудов (см. „Простое учение о воздушном корабле“) и из гл. V этой работы. Но могут быть и значительные отклонения в устройстве газового корабля. Система его в частности может быть весьма разнообразна. В этой главе займемся оценкой выгод и невыгод разного рода деталей.

Различные системы аэростатов

505. Вот — система весьма изящная (черт. 33). Впрочем, по чертежу об этом нельзя судить, так как этот и все последующие чертежи гл. XI схематичны, т. е. масштаб в разных направлениях и для разных деталей, переменный. Преимущества этой системы сравнительно с описанной уже — следующие.

а) Простое устройство ладьи без выдвижных цепей сложного устройства.

б) Уменьшение сопротивления корабля при рассечении им воздуха, ибо все цепи заключены внутри оболочки.

в) Уменьшение высоты всего корабля.

г) Устранение возможных качаний ладьи.

д) Большая доступность аэростата, в особенности в местах соединений.

е) Близость ладьи к оболочке.

ж) Устранение подвижных частей черной нагревающей трубы и вообще частей, пропускающих пары и газы.

з) Значительная устойчивость продольной оси аэростата — вследствие помещения гребного винта на конце оболочки и уменьшение от этого работы регулятора горизонтальности продольной оси корабля (горизонтальный руль и продольное перемещение ладьи).

506. Вычисления показывают, что подобная система вполне возможна; но необходимо показать и обратную сторону медали, т. е. невыгоды ее. Вот они:

а) меньшая полезность гребного винта, так как производимый им обратный воздушный ток будет давить на корабельный корпус в сторону, обратную его движению; это неблагоприятное давление будет относительно больше, чем у парохода, ибо у последнего есть возможность весьма заострить кормовую часть корабля и удалить от нее винт;

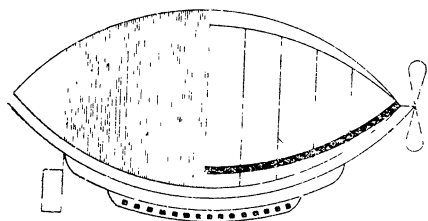
б) утяжеление концов массивных брусьев, вследствие чего

в) нельзя употребить очень сильные двигатели и тяжелый гребной винт. В случае же принятия паровых двигателей пар придется подводить издалека — из средних частей ладьи;

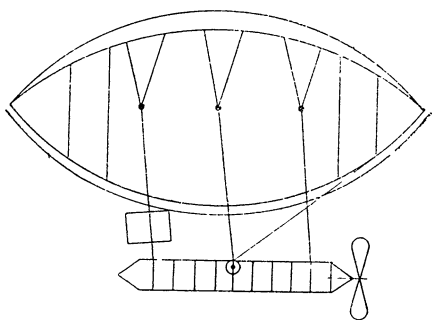
г) высокое помещение центра тяжести ладьи;

д) необходимость искусственного стягивания оболочки посредством внутренних цепей между продольными брусками, что требует тяжелых и сложных сооружений и значительной работы.

507. Мы видим, что хотя эта система привлекательна и имеет громадные преимущества, но имеет также и немалые недостатки. Одно, например, стягивание цепей, без которого трудно достигнуть устойчивости продольной оси, представляет серьезные затруднения. Правда, и при выдвижных цепях, когда оболочка стягивается тяжестью ладьи, затруднений немало.



Черт. 33.



Черт. 34.

Системы стягивания мы разберем в свое время в этой же главе.

508. Описанная сейчас система может быть изменена так, что один из ее важных недостатков будет устранен, а другой ослаблен; причем сложность корабля увеличится, а наружное изящество нарушится.

См. черт. 34. Проект представляет смесь двух известных крайних систем (черт. 1 и 33). Высшие точки средних цепей имеют неподвижную опору на продольной оси оболочки. Средние цепи, на которых висит ладья, изображены на чертеже чуть отклонившимися от отвесного направления вследствие работы гребного винта. Они должны свободно скользить вверх и вниз через прорезы в нижней массивной полосе, а также и отклоняться от вертикального положения при действии винта. Для каждой цепи — особый прорез в оболочке. Прорезы герметически закрываются движущимися пластинками (35, а).

Благодаря такому устройству давление на гребной винт как бы приложено к носу оболочки или к какой-либо точке продольной оси. Таким образом важное преимущество (3) предыдущей (34) системы сохраняется, между тем как трех громадных недостатков ее не будет (а, б, в). Именно, гребной винт помещается там, где следует, и потому он не будет давать обратного воздушного тока, увеличивающего сопротивление движению корабля; другие недостатки — утяжеление концов продольных массивных полос и невозможность употребить сильные двигатели, — также в этой системе не существуют.

509. Далее, работа стягивания цепей уменьшается раза в два, так как средняя часть оболочки стягивается естественным путем — тяжестью ладьи и помещенных в ней грузов. Часть пассажиров может помещаться в ней, а другая — выше, в ладье, примыкающей непосредственно к оболочке и привешенной к двум нижним продольным брусам, как в предыдущей системе (черт. 33).

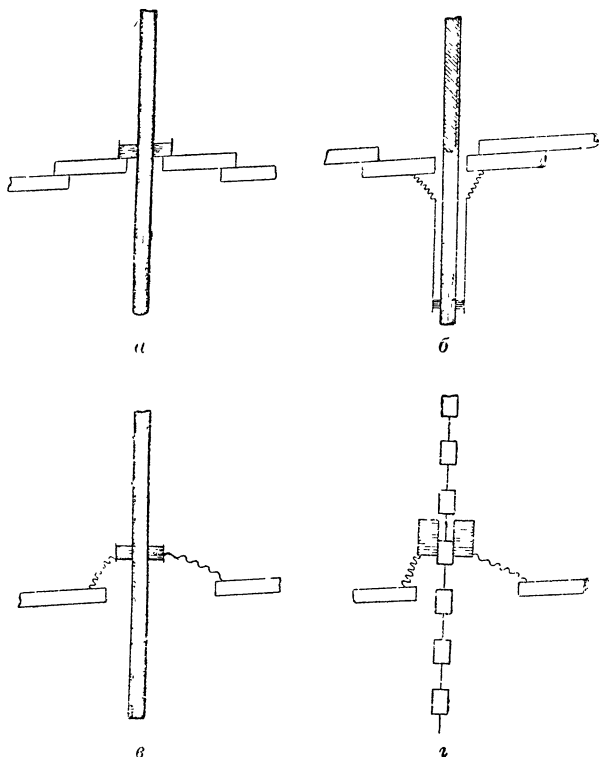
Горизонтальность аэростата можно регулировать ручным или автоматическим способом посредством самого незначительного перемещения центра тяжести нижней ладьи — с помощью наклонного тяжа (черт. 34). Движение же винта и перемены в его скорости почти не будут иметь влияния на горизонтальную устойчивость продольной оси, если только цепи не упрутся в края разрезов.

510. Продольного изгиба цепей благодаря их свободному колебанию в разрезах быть не может, но поперечное изгибание не устранимо при по-

перечных качаниях ладьи, не синхронных с качаниями оболочки.

Это есть уже недостаток сравнительно с предыдущей системой. Есть и еще недостаток: центр тяжести лежит высоко, а потому высота метацентра над ним мала*. Недостатком является также и усложнение устройства. Так, из черт. 35, а видно устройство продольных разрезов и закрывающих их пластин.

Цепи могут иметь и не цилиндрический вид, а неправильный, и даже состоять, как обыкновенные цепи, из эллиптических звеньев; но тогда требуются особые трубки, как это видно из черт. 35, б. Верхняя часть цепи при этом все-таки должна быть гладкой и цилиндрической.



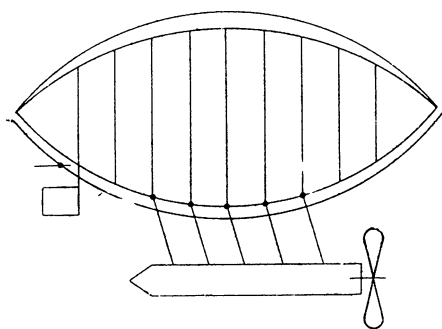
Черт. 35.

* Ибо нижняя ладья как бы помещается на продольной оси оболочки.

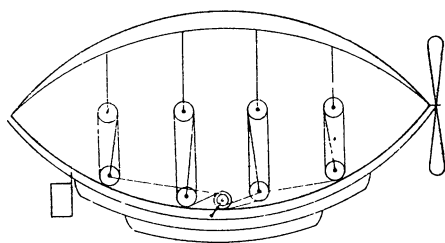
511. Эта конструкция корабля сравнительно с предыдущей имеет еще немаловажное преимущество. В самом деле, объем оболочки может несколько изменяться и без разматывания крайних цепей, так как цепи средней части оболочки не связаны с нижней продольной полосой и потому в этом месте объем газоместилца может увеличиваться и уменьшаться до известных пределов.

512. Механизм, изображенный на черт. 35,а или 35,б, может быть упрощен, как это видно из черт. 35 в и г.

На последнем чертеже цепь составлена из звеньев с промежуточными частями любой неправильной формы. Цепь охватывает муфточку, длина которой больше длины неправильного



Черт. 36.



Черт. 37.

звена; наконец, между краями муфточки и краями щели складками располагается непроницаемый для газа фартук. Муфточка вместе с фартуком удерживается не изображенной на чертеже задержкой всегда *внутри* оболочки.

513. Если бы не трудности искусственного стягивания оболочки с помощью цепей, то можно бы предложить более простую систему, чем предыдущая. Новая система, как видно из черт. 1 и 36, напоминает нашу основную конструкцию (черт. 1); отличается же от нее тем, что все цепи стягиваются искусственно по мере надобности.

Здесь, как и в основной системе (черт. 1), при работе гребного винта образуется пара сил, которая будет вращать аэростат в вертикальной плоскости, подымая его нос; но эта пара, как я говорил, согласно моим расчетам, легко уравнивается незначительным перемещением центра тяжести ладьи с помощью наклонного тяжа.

514. Главное достоинство этой системы состоит в том, что наружные цепи сохраняют неизменную длину, несмотря на изменение объема газа, так что каждая из них может состоять из одного звена с шарнирами на концах. Как на достоинство, укажем также на происходящую отсюда устойчивость нижней ладьи. Неудобство же опять-таки состоит в искусственном стягивании оболочки и высоком положении пассажиров в верхней ладье.

Если бы не стягивание, то этот проект был бы одним из лучших. Поэтому ввиду чрезвычайной важности исследовать способы и трудности искусственного стягивания оболочки аэростата, я тут опишу некоторые приемы стягивания и сделаю их оценку.

Блочное стягивание

515. Начнем с наиболее практического: стягивания цепей посредством полиспастов. Оно изображено на черт. 37. Сила, потребная для стягивания какой-нибудь цепи, обратно пропорциональна числу блоков на полиспасте, с помощью которого происходит стягивание. Выгодно число блоков на каждом полиспасте довести примерно до десяти, чтобы не было большого продольного давления на нижнюю массивную полосу. Если это давление невелико, то оно даже способствует целости полосы. В самом деле, как видно из чертежа, два ряда продольных давлений направлены друг другу навстречу, к средней массивной полосе. Эти давления противоположны давлению легкого газа, стремящегося растянуть и разорвать массивные брусья*.

516. Колеса блоков будут наименьшего диаметра, если для полиспастов употребить веревки из какого-либо мягкого и крепкого органического материала. Чистый же и сухой водород внутри оболочки аэростата никогда не может повредить таким бечевкам. При употреблении обыкновенных цепей диаметр блоков должен быть больше. Что касается употребления тросов, то их гибкость возрастает с утонением составляющих их металлических нитей и потому величина блоков тут будет зависеть от конструкции канатов.

Для поворачивания вала, на который наматываются все веревки (черт. 37) с блоков, нужна машина сил в десять. При меньшей мощности стягивание будет чересчур медленным.

517. Выгоды этой системы стягивания оболочки следующие:

а) Стягивание в разных сечениях оболочки может подчиняться желаемому закону; например, к концам аэростата оно может убывать пропорционально сечению оболочки.

б) Сближение стягиваемых продольных полос оболочки может быть произвольно велико — даже почти до соединения верхних брусьев с нижними.

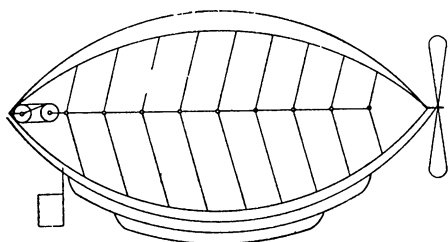
в) Увеличение прочности нижней массивной полосы, о чем говорено.

г) Произвольно малая сила, потребная для стягивания, ибо она зависит от числа блоков.

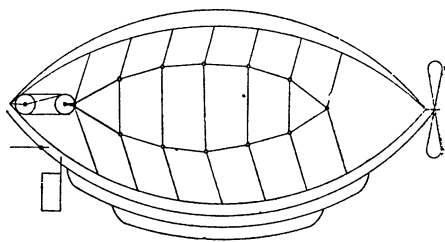
Неудобство состоит в некоторой сложности и дороговизне системы. Понятно, что стягивание может производиться другой конструкцией блоков, например дифференциальными блоками.

* Но в известной мере продольное их натяжение необходимо для предотвращения сжатия, порождаемого вертикальным изгибающим моментом.

Есть еще другая система стягивания, весьма привлекательная своей простотой; но употреблять ее выгодно только тогда, когда наибольшее потребное изменение объема газоместителя чрезвычайно мало (черт. 38). Стягивание тут сосредоточено на одном из концов оболочки. При значительном изменении объема аэростата, какое и необходимо на практике, давление на продольные брусья будет так громадно, что почти исключает возможность применения этой простой конструкции. Кроме того, стягивание этим способом или, точнее, сближение частей оболочки не будет пропорционально величине сечения, а наоборот, в середине оболочки оно будет наименьшее, а к концам ее возрастет.



Черт. 38.



Черт. 39.

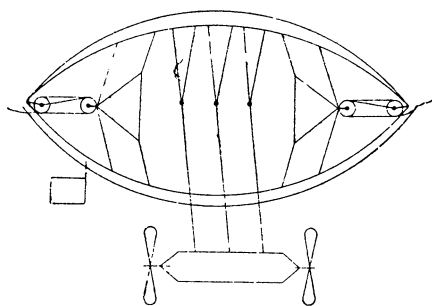
518. Последний недостаток можно устранить, несколько изменяя предыдущую конструкцию. Так, из черт. 50 видно, что при изображенном устройстве стягивание в среднем поперечном сечении оболочки будет наибольшим. Вообще, изменяя длину звеньев (или стержней), можно по желанию регулировать стягивание.

519. Этот способ скорее можно применить как дополнение к системе корабля, изображенной на черт. 34. В таком случае стягивание производится в двух концах оболочки одновременно (черт. 40). Тут главная работа стягивания производится естественным путем: тяжестью опускающейся ладьи; на долю же искусственного стягивания придется менее половины, да и оно распределяется на два конца аэростата. Таким образом здесь давление на массивные брусья сравнительно с предыдущим (черт. 39) уменьшается, по крайней мере, в 4 раза. И все-таки даже при этой системе (черт. 40) воздушного корабля предпочтение, пожалуй, придется отдать стягиванию посредством блоков (черт. 37), где прочность продольных брусьев только выигрывает.

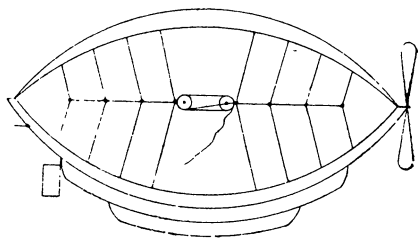
520. Главное неудобство стягивания в последних трех системах (черт. 38, 39 и 40) состоит в громадном продольном сжатии массивных брусьев, которое хотя и противоположно по направлению растягивающему действию газов, но может превысить последнее, что безусловно и всегда верно для концов оболочек. Действительно, чем ближе к концам оболочки, тем давление газов, растягивающих брусья, все менее и менее зна-

чительно, между тем как сжимающее усилие от стягивания возрастает в первых двух системах от правого конца к левому, достигая тут наибольшей величины и обязательно комкая бруссы. В последней же системе (черт. 40) сжимающее усилие будет на обоих концах и только среднее пространство брусьев будет свободно от влияния стягивания.

521. Черт. 41 показывает, как можно устроить, чтобы *оба* конца оболочки были свободны от продольного сжимающего усилия и чтобы оно возрастало от концов к середине подобно растягивающему действию упругости газов. Это — весьма, выгодная конструкция, как показывают расчеты, но и у ней есть ахиллесова пята.



Черт. 40.



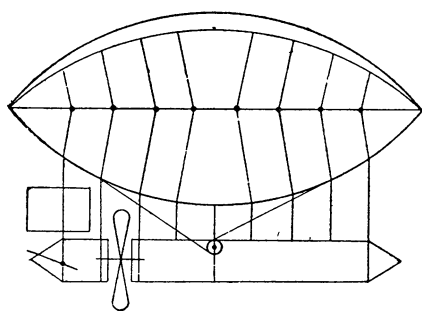
Черт. 41.

Подобное стягивание посредством многоблочного полиспаста (черт. 41) производить очень удобно: и на любом из концов оболочки и где-нибудь сбоку или снизу оболочки (черт. 41). Сила, необходимая для такого стягивания ввиду многоблочности полиспаста может быть весьма мала и потому она не нарушит заметно форму оболочки, если даже веревка будет проведена отвесно вверх или вниз оболочки. Но беда в том, что эта система не дает устойчивого горизонтального положения продольной оси аэростата. В самом деле, при всяком отклонении ее от горизонтальности одна половина оболочки будет раздуваться газом, а другая сожмется — уменьшится в объеме настолько, насколько увеличилась другая (при несильном наклоне аэростата); центр подъемной его силы переместится горизонтально и наклон оси может нарушиться еще больше. Чтобы равновесие было устойчивым, необходимо оба конца горизонтальной соединяющей цепи (черт. 41) продолжить, пропустить через концы оболочки и тут закрепить; тогда не будет горизонтального перемещения соединяющей цепи и блоков, а вместе с тем и перемещения центра подъемной силы газа.

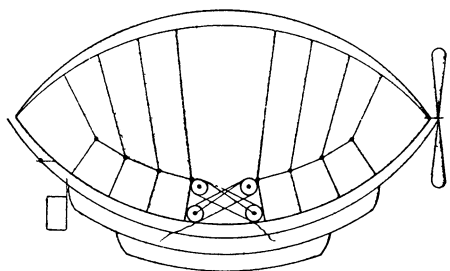
Выходит, что здесь стягивание и отпускание концов продольной цепи (черт. 42) должно происходить одновременно и согласно расчету. Вообще система эта не так проста, как кажется с первого взгляда.

522. Но все-таки она заслуживает внимания, так как дает возможность перемещать в горизонтальном направлении центр подъемной силы газа. Объем его при этом почти не изменяется, потому что обыкновенного блочного стягивания тогда не делают и расстояние между блоками остается прежнее, но перемещают продольную горизонтальную цепь вправо или влево, отчего туда же двигается и центр подъемной силы. Передвижение его есть могучее средство для борьбы с нарушением горизонтальности продольной оси аэростата.

523. Центр подъемной силы можно перемещать и в конструкции (черт. 40), если расстояние между блоками справа укоротить, а слева — настолько же уменьшить, или наоборот.



Черт. 42.



Черт. 43.

524. Черт. 42 показывает устройство цепей для перемещения центра подъемной силы при системе естественного стягивания оболочки, т. е. тяжестью ладьи (черт. 1).

525. Черт. 43 выражает еще мысль о стягивании, при котором нет надобности в закреплении соединяющей цепи у концов оболочки; эта система, однако, не выдерживает критики. Действительно, опора невзаимная, когда правая половина цепей опирается на левую; тут каждая половина всей цепной системы опирается на нижнюю массивную полосу. Вертикальная составляющая этой силы стремится поднимать часть продольного массивного бруса кверху. Давление это громадно и то увеличивается, то уменьшается, а потому не может быть уравновешено постоянной силой тяжести.

Стягивание винтами

526. Можно стягивать оболочку и посредством винтов, как это показано на черт. 44. Недостатки этого способа таковы:

а) большое трение; б) большой вес винтов; в) скручивание их; г) трудность одновременно производить свинчивание; д) необходимость препятствовать закручиванию верхних парных цепей или тяжей.

Приспособления при стягивании оболочки тяжестью ладьи

527. Стягивание естественное, по черт. 1, требует особых приспособлений, для того чтобы горизонтальное положение продольной оси аэростата было устойчиво. Некоторые из этих приспособлений уже описаны мною в предыдущих моих трудах (см. „Простое учение о воздушном корабле“ и „Аэростат металлический, управляемый“).

Черт. 45 (или 46) представляет схематически устройство изящнейшего из этих приспособлений.

При увеличении объема газа цепи входят в оболочку одновременно и симметрично относительно плоскости среднего поперечного сечения. Тут нет заботы о неправильном расширении оболочки и об ее целости, пока расширение не достигло объема, близкого к наибольшему, — когда аэростат достигает формы поверхности вращения (на чертежах не изображены совсем опоры колес; зубцы их также не обозначены; цепи представлены гладкими).

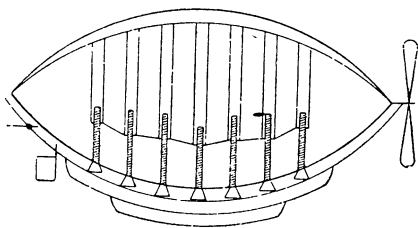
Цепи, прилегающие к зубчатым колесам, и цепные части отвесных стержней, касающиеся шестерней, могут иметь самый обыкновенный вид, т. е. состоять из эллиптических звеньев, взаимно перпендикулярных (черт. 47).

Для уничтожения же прохода газов через цепные отверстия может служить приспособление, изображенное на черт. 35, б, только трубка будет обращена вниз, т. е. она будет находиться вне оболочки аэростата (черт. 47).

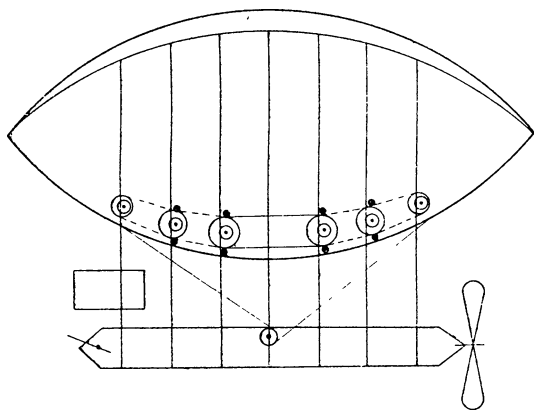
Цепи особыми роликами или пазами должны быть защищены от схода с колес.

Из сказанного видно, что механизм этот далеко не так прост, как изящен по своей принципиальной схеме. Впрочем, устройство цепей по черт. 46 проще; еще проще сохранение газа при употреблении гладких стержней-цепей (черт. 9). Во всяком случае, без практического испытания верить в этот прибор трудно.

528. Как будто элементарнее приспособление, изображенное на черт. 48, где представлен вид оболочки снизу или горизон-



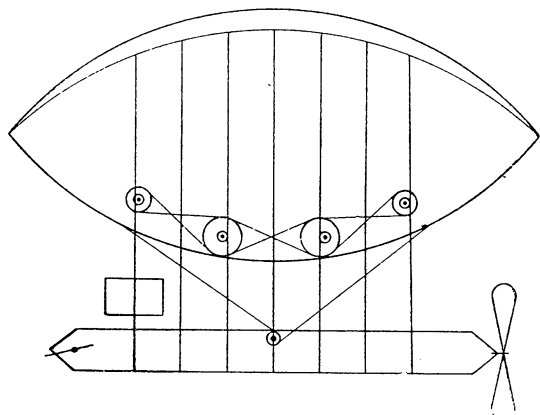
Черт. 44.



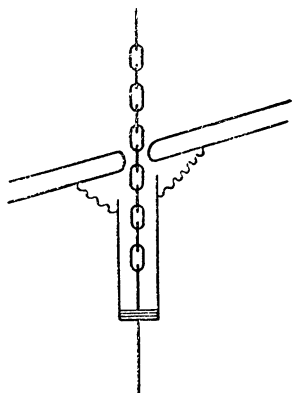
Черт. 45.

тальная проекция интересующих нас частей. Тут каждый ряд гладких цепей (черт. 9), при выходе их из оболочки, охватывается с двух сторон парой стержней с перекладинами, пружинами и затычками. Движением двойного стержня можно соединить вертикальные цепи в одно целое с нижними продольными брусьями (черт. 48, сверху).

Обратным движением можно сделать расщепление и стержни будут свободно входить и выходить из оболочки (черт. 48, снизу).

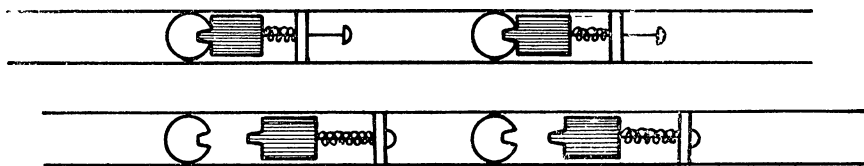


Черт. 46.



Черт. 47.

529. Обыкновенно цепи описанным приспособлением скреплены с нижней продольной частью оболочки. Но если газ напряжен и стремится расширить оболочку, что всегда видно по выпиранию ее у нижних массивных брусьев, то продольным стерж-



Черт. 48.

ням (черт. 48) сообщают краткое движение, чтобы освободить оболочку от вертикальных цепей. Когда оболочка расширится и примет естественную форму, что видно по отсутствию выпуклости или вогнутости ее у нижних массивных полос, — цепи опять запирают (черт. 48, сверху), чтобы устойчивость продольной оси аэростата не могла нарушиться.

530. Во время расщепления (черт. 47, снизу) может произойти неправильное расширение оболочки, т. е. несимметричное

движение цепей, отчего переместится горизонтально центр подъемной силы и воздушный корабль наклонится. Для избежания такой опасности надо это делать быстро и непременно при горизонтальном положении продольной оси, что всегда можно сделать по указанию чувствительного уровня.

531. Ради еще большей безопасности следует сначала отцепить или освободить один ряд отвесных цепей (черт. 1) и, укрепив его, приступить к другому; потом опять к первому и т. д., пока оболочка не расширится достаточно. В этом приспособлении два параллельных ряда вертикальных цепей, на которых держится ладья, как кажется, весьма полезны.

Когда газу *свободно* * и воздушному кораблю грозит от этого опасность потерять горизонтальное положение, то цепи также описанным приспособлением, последовательно или сразу, если можно, освобождают от оболочки, отчего последняя в нижних своих частях, скользя через цепи, подымается, принимая нормальный вид.

Если некоторые или даже все затычки не попадут в отверстия вертикальных цепей, то легкое колебание аэростата или общее расширение его, как и сжатие, совершат это дело. Можно еще для уничтожения „напряженности“ или „слабости“ газа спускаться на *горизонтальную* поверхность земли и тут уже без всякого опасения придать оболочке нормальную форму. Если же поверхность данной местности негоризонтальна, то ладью все-таки с помощью ватерпаса и якорных цепей разной длины можно установить правильно. Не забудем, что отверстия находятся в промежуточных очень коротеньких и крепких звеньях, так что цепи могут качаться без вреда для себя — после их закрепления, см. (131).

532. Другого рода механизм для закрепления цепей в оболочке, при естественном стягивании, изображен еще на черт. 49. Вид системы нам знаком, но надо иметь в виду, что при стягивании тяжестью ладьи, когда продольная ось горизонтальна, напряжение второстепенных косвенных цепей, служащих для закрепления главных, весьма незначительно и в сущности равно нулю, если не считать трения, тяжести их и других сравнительно малых сил. Совсем другое мы видим при искусственном стягивании (черт. 37—43) подобным же приспособлением. Назначение предлагаемого механизма есть не стягивание, а *закрепление* цепей — на случай действия сил при наклоне продольной оси оболочки. Поэтому вспомогательная эта система может быть весьма *легка* и не может идти ни в какое сравнение со схожей системой, но употребляемой для искусственного стягивания оболочки.

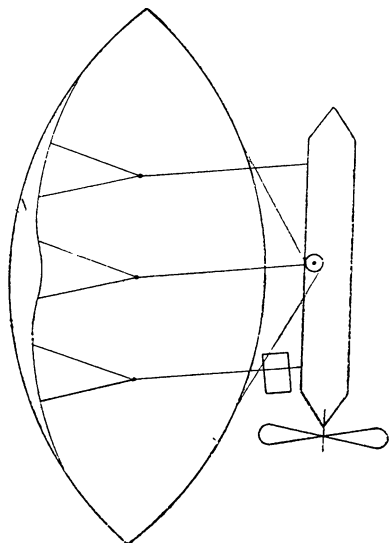
533. *Закрепление* естественного стягивания может производиться и согласно черт. 37—43. Предпочтительнее блочная система черт. 37 и система, представленная на черт. 43. Блочная система предпочтительна потому, что закрепление стягива-

* При недостаточном сверхдавлении.

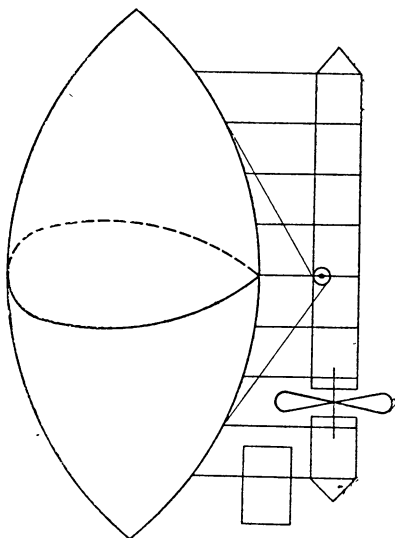
ния возможно при любой величине стягивания и легко может быть с ним согласовано.

Нельзя ли обойтись без закрепления естественного стягивания?

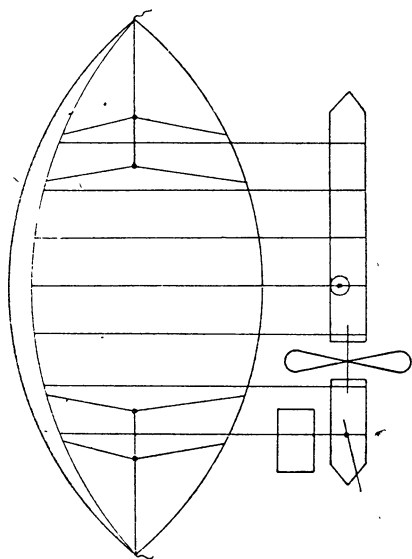
534. Мы идем вперед, предлагая более или менее осуществимые способы закрепления естественного стягивания для дости-



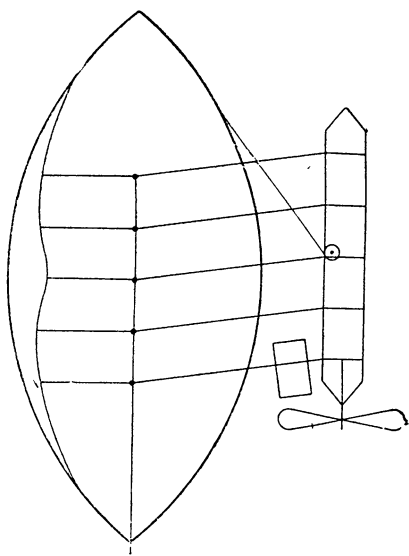
Черт. 50.



Черт. 52.



Черт. 49.



Черт. 51.

жения устойчивости горизонтального положения продольной оси корабля; но нас смущает сложность всех этих приспособле-

ний и потому невольно рождается вопрос: нельзя ли совсем обойтись без укрепления естественного стягивания?

Черт. 50, 51, показывают, как можно решить такую задачу.

Стягивание и вдавливание оболочки будут преимущественно в средней ее части; но чем дальше от этой середины, тем оно меньше и форма поперечного сечения оболочки ближе к окружности.

535. При наклонении аэростата газ не имеет возможности расширять удаленные от среднего поперечного сечения части оболочки и потому центр подъемной силы газа передвинется не очень сильно в сторону поднятого конца аэростата. При небольшой его продолговатости может получиться устойчивость продольной оси. Окончательно этот вопрос может решить только опыт с небольшими аэростатами или с мешками такой же формы — в воде. Опыт определит и наибольшую возможную при этой простой системе продолговатость оболочки при тех или других условиях.

Недостаток конструкции в том, что изменение объема газа меньше, так как вдавливается только средняя часть оболочки, и в том, что форма ее менее правильна; кроме того, и продолговатость едва ли может быть значительна. Достоинство системы — в простоте и применении укороченной ладьи.

Полное отсутствие стягивания

536. При малой продолговатости оболочки можно совсем обойтись без стягивания сверху, т. е. без внутренних цепей (черт. 52).

Конструкция будет еще проще, если ладья будет прикрепляться непосредственно к нижним продольным брускам (черт. 53).

Недостаток этих систем (черт. 52 и 53) — чрезвычайно малая устойчивость продольной оси. Для устранения его *нужно*:

а) или сильно надувать оболочку газом, но тогда объем ее не может свободно изменяться, что недопустимо;

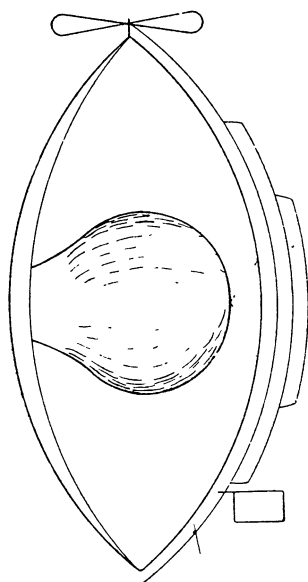
б) или делать аэростаты малопродолговатые, что затруднительно в отношении конструкции и, кроме того, такой воздушный корабль не будет иметь надлежащей самостоятельной скорости вследствие увеличения сопротивления *;

в) или очень низко помещать ладью, что вызовет усиленное сопротивление воздуха и родит пару сил, устранить которую будет нелегко, если не поместить гребной винт на одном из концов оболочки; последнее, как мы видели, опять-таки представляет мало привлекательного.

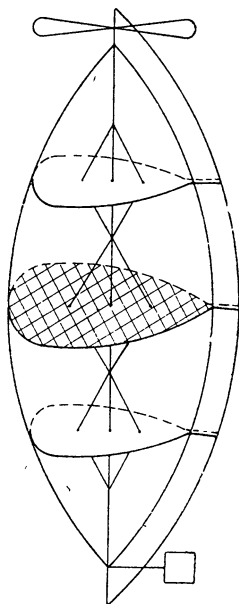
537. Некоторым усложнением системы ее недостаток можно устранить. Мы употребим прием всем известный — баллонет внутри оболочки, надуваемый более или менее воздухом (черт. 54) —

* Впрочем, как показывает опыт американского цельнометаллического дирижабля ZMC-2, у которого продолговатость 2,8, скорость от малых значений продолговатости уменьшается незначительно.

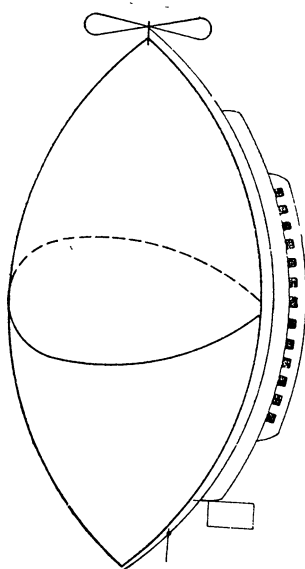
средство как будто весьма хорошее, так как достигается не только устойчивая горизонтальность продольной оси, но является, повидимому, возможность обойтись без складок на внешней оболочке.



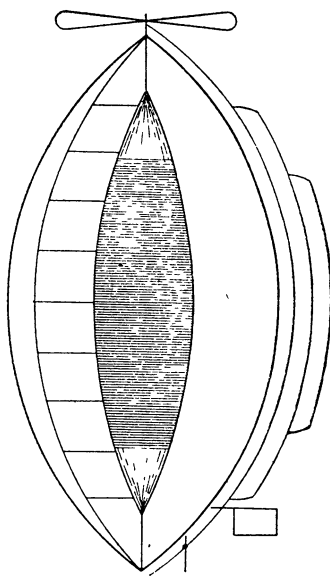
Черт. 54.



Черт. 56.



Черт. 53.



Черт. 55.

Действительно, вдвывая в баллонет воздух, мы можем наружный объем оболочки, при всех изменениях плотности окружающей корабль атмосферы (и даже газа), сохранить неизменным,

а вместе с тем *приблизительно* будет сохраняться неизменной и форма оболочки. Сохранение же ее обусловит и устранение волнистого металла для построения аэростата. Эти хорошие выводы придется омрачить по следующим причинам: а) постоянство формы оболочки только *приблизительно*; б) ее трудно сохранить неизменной еще потому, что нельзя сохранить объем внешней оболочки строго постоянным; в) при неизбежных наклонах продольной оси аэростата форма его должна изменяться, почему на гладкой оболочке неизбежно должны получиться трещины или складки; г) кроме того, самое построение оболочки из гладкого материала в высшей степени затруднительно, так как тогда придется строить аэростат в выпуклом виде, или в раздутом состоянии; д) также затруднительно в таком состоянии и надувать его газом. После совершения этого процесса и при других неизбежных манипуляциях можно сказать наверняка, что на оболочке корабля образуются складки и трещины*.

538. Но и этим проблема еще не кончается. Спрашивается, из чего сделать внутренний мешок? Если из органического материала, то это все равно, что и самый аэростат делать из такого же материала, так как размеры баллонета не могут быть малы и, следовательно, диффузия будет громадна; таким образом, спустя немного времени после наполнения корабля газом, мы будем носить с собой, в самом центре аэростата, взрывчатое вещество — целую мину, уже не говоря про потерю газа и подъемной силы, что выяснено мной давно.

539. Если устраивать мешок из металла, то неизбежно придется делать его продолговатым, потому что он должен сильно изменять свой объем; а тогда не избежать складок. В таком случае придется привешивать его к верхней массивной полосе (черт. 55).

Все это не так просто и вызывает разные осложнения. Так, при наклонении аэростата тяжелый воздух во внутреннем мешке устремляется вниз, утяжеляет понизившуюся часть воздушного корабля и тем способствует еще большему нарушению горизонтальности продольной оси; таким образом, ради избежания этого требуется еще новый аппарат для искусственного стягивания оболочки баллонета. Мягкий мешок, т. е. из органического материала, не лишен того же недостатка — способствовать нарушению горизонтальности продольной оси корабля. Мы уже не говорим про необходимость вентилятора, для надувания баллонета, и двигателя, — для приведения в действие воздуходувки, как о вещах, сравнительно легко осуществимых.

540. Сказанного достаточно, чтобы совершенно отказаться от мысли употреблять баллонет в металлических аэростатах. Употребление его еще невыгодно и потому, что воздушный корабль, сохраняя всегда свой объем неизменным, должен развивать

* Указанные трудности построения баллонетных дирижаблей с металлической оболочкой, не способной изменять свой объем, преодолеваются при помощи введения в систему каркаса. Это осуществлено в опытном американском дирижабле ZMC-2, объемом 5700 м³, построенном в 1929 г.

большую энергию, чтобы пробиваться в более плотной среде; между тем как аэростат без внутреннего мешка сжеживается в плотной среде и потому легче ее рассекает.

Но есть еще средство помешать неустойчивости продольной оси корабля и вместе с тем обойтись без внутреннего баллонета и сопряженных с его употреблением затруднений. Это — поперечные перегородки из очень мягкой и легкой материи (черт. 56).

Достоинства этой системы в следующем:

а) Аэростат можно делать очень продолговатым, что представляет огромное облегчение в конструкции металлической оболочки, так как уменьшает размер складок или волн на ее поверхности. Острота формы способствует также, до известного предела, быстрой самостоятельному движению аэростата.

б) Диффузия устранена; перегородки даже могут до известной степени быть и механически проницаемы для газа. Только тогда, при стоянке, придется открывать сообщение между отделениями для восстановления в них нормальных количеств газа.

в) Передвигая выпуклости перегородок посредством веревок в ту или другую сторону, мы можем увеличивать подъемную силу того или другого конца аэростата и тем постоянно регулировать горизонтальность продольной оси корабля при нарушении ее какими-либо причинами.

г) Сумма поверхностей перегородок мало отличается от поверхности баллонета, между тем как качество их может быть гораздо ниже.

д) В плотной среде аэростат сжимается по высоте и в объеме и представляет меньшее сопротивление, чем аэростат с баллонетом. Вообще его форма в вертикальном направлении удлинена, напоминая форму большинства рыб, отчего он может быстрее совершать вертикальные передвижения, в особенности — поднятие.

е) По той же причине поперечное натяжение оболочки меньше, она прочнее, а при той же прочности аэростат может быть больше и грузоподъемнее.

Чрезвычайная простота устройства такого воздушного корабля заставляет нас обратить на него особенное внимание. Пожалуй, что при первых опытах построения металлической оболочки эта система наиболее осуществима. Можно даже, на первое время, сделать оболочку из гладкого материала с мягкими складками, прикрытыми металлическими закраинами. Так, мы можем достигнуть наименьших размеров металлического мешка при большой продолговатости и, следовательно, при значительной самостоятельной скорости (см. 342—346).

Не забудем еще, что аэростат с перегородками гораздо безопаснее, так как утечка газа в случае порчи оболочки задерживается перегородками.

Недостатки системы заключаются в следующем:

а) Тяжесть перегородок с их сетями (ромбические сети; черт. 56) действует на массивные брусья и на обручи, вследствие

чего усложняет форму оболочки и требует специального изменения в устройстве обручей и брусьев. Но чем больше перегородок, тем этот недостаток менее заметен; только при множестве перегородок мы попадаем в другой грех: сложность и громадность их поверхности.

б) Другой недостаток в том, что мягкие оболочки легко подаются под напором газа и, следовательно, способствуют постоянным, хотя и незначительным, колебаниям продольной оси и вредным деформациям металлической оболочки.

В отношении безопасности, при поранениях металлической оболочки, полезно всю ее внутренность составить из ячеек, например, в 1 или 8 м³ каждая. Перегородки эти, продольные и поперечные, конечно, тоже должны устраиваться из мягкого материала. Такая система как будто уничтожает все указанные недостатки, да еще дает и величайшую безопасность.

Но, к сожалению, это не совсем так. Действительно, устойчивость получается только при *натянутых* продольных перепонках (да и то неполная). Натянуты же они быть не могут, так как общая форма оболочки постоянно изменяется и потому при ее изменении продольные перепонки или порвутся или съежатся; ни то, ни другое недопустимо, а потому вся система находится под некоторым сомнением.

Выводы из предыдущих проектов

541. Только обширные и подробные вычисления и, главнее, опыт могут окончательно решить, какая из описанных систем наиболее выгодна и осуществима — и при каких обстоятельствах.

Тем не менее, обращаясь к металлическому кораблю в его чистом виде (т. е. без перегородок из органического материала), мы не можем удержаться, чтобы не предложить читателю еще проект воздушного корабля, представляющий вывод из предыдущих проектов (черт. 34, 35, 37 и 50). Мы намерены выбрать самое лучшее. Хорошо, чтобы оболочка корабля стягивалась естественным образом — тяжестью ладьи * и хорошо, чтобы давление на гребной винт передавалось на продольную ось азростата; но это не должно сопровождаться помещением винта на конце оболочки. Мы все это берем (черт. 34) для нашего нового проекта. Мы также пользуемся наилучшим способом закрепления цепей с помощью блоков (черт. 37). Мы вспоминаем также систему черт. 50 и вводим ее *отчасти*, так как концы оболочки на значительном протяжении не будем стягивать, вследствие чего эти концы в своем поперечном сечении будут близки к кругу. Мы уменьшаем до минимума число вер-

* В современной схеме металлического азростата Циолковского (см. „Проект металлического дирижабля на 40 чел.“ того же автора) стягивание оболочки производится не весом гондолы, а при помощи стягивающей системы, в которой цепи, скользящие сквозь оболочку, заменяются тросами с внутренней стороны оснований; сальники оставлены только для валов лебедок.

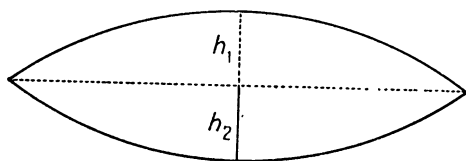
тикальных цепей, чтобы упростить наш корабль до последней возможности. Ввиду незначительного числа цепей и прорезов мы принимаем наиболее изящный способ закрытия щелей (черт. 35). Для облегчения устройства и веса ладьи мы главные тяжести сосредоточиваем на вертикальных цепях: таковы двигатели, запасы топлива и провизии, товары и т. д. Каюты же можно располагать далее от главных цепей. Цепи можем заменить массивными цилиндрическими стержнями или, по крайней мере, несгибаемой может быть часть цепи, скользящая через оболочку. Для безопасности эта часть может состоять из цилиндрической трубки, внутри которой помещается металлический канат. В случае полома трубки канат спасет. Закрепление цепей, управление, регулирование — все сосредоточено на ладье. Галлерея под нижней частью оболочки будет открытая, легкая и предназначена только для осмотра соединений оболочки, цепей, стержней и труб, в нее входящих. Если понадобится, гребной винт можно поднять выше и тогда его лопасти при вращении не будут выходить за пределы пола ладьи.

XII. Расчеты некоторых деталей параболического * аэростата. Вес их

Высота центра давления ветра на оболочку

542 **. Верхний и нижний продольные брусья вообще неравны между собой. Условимся продольной осью называть прямую линию, проходящую через концы оболочки или концы брусьев (черт. 57).

При самостоятельном движении аэростата встречный воздушный поток производит на поверхность оболочки известное да-



Черт. 57.

вление, центр которого может лежать выше или ниже. Это зависит от отношения между длинами продольных брусьев или от отношения между длинами их стрелок h_1 и h_2 . Например, на черт. 11 нижняя фигура изображает оболочку, в которой центр давления, действующего на

оболочку, близок к центру подъемной силы газа, у средней фигуры центр давления ниже, у верхней — выше.

* Для простоты расчетов мы приняли в этой главе форму аэростата параболической, хотя в отношении гофрировки его поверхности выгоднее другая форма. Но последняя довольно близка к параболической и расчеты этой главы приблизительно применимы и к форме, наилучшей в отношении правильного растяжения гофрированной поверхности.

** Начиная с этого параграфа, нумерация не совпадает с нумерацией параграфов первого издания труда „Аэростат и аэроплан“, где нумерация дана с пропуском.

Прим. автора.

Прим. ред.

543. Тяговое усилие, передаваемое вращающимся гребным винтом, при самостоятельном равномерном движении аэростата равно давлению встречного потока или давлению ветра на поверхность воздушного корабля. Если винт устроен на *относительно* неподвижной ладье, то центр этого давления совпадает с геометрическим центром винта или с его осью. Подобная система изображена на черт. 1. Если же имеем лучшую систему (черт. 33 и 34), то центр тяги будет близок к продольной оси оболочки. Он даже должен был бы совпадать с центром давления ветра на оболочку. Равновесие требует, чтобы оба центра совпадали; вообще же они образуют пару сил, которая стремится тем сильнее наклонять аэростат, чем больше разница между высотами этих центров.

544. Эта *пара* сил, хотя и может всегда уравновеситься перемещением центра тяжести аэростата (например, отклонением его ладьи вправо или влево) или перемещением центра подъёмной силы газа (черт. 42), но лучше, если она будет как можно ближе к нулю. Стало быть, если центр тяги лежит ниже центра давления встречного воздушного потока, то оболочке следует придавать сверху более выпуклый вид (нижняя фигура черт. 11). Заметим, что и при совпадении центров тяги и давления ветра равновесие устанавливается только при равномерном горизонтальном движении аэростата или при очень малом его ускорении — положительном или отрицательном. Если же винт сразу заработает быстро, то воздушный корабль, без принятия особых мер, будет сначала обязательно *клевать*, что зависит от того, что центр инерции корабля обыкновенно не совпадает с центром давления ветра. Неудобство такого способа совмещать центры давлений состоит еще в том, что вследствие искажения формы оболочки, сопротивление ее движению возрастает и построение такой оболочки труднее. При хорошей системе аэростата, когда центр давления на гребной винт передается на продольную ось, нет надобности в этом искажении (черт. 34).

Среднее положение центра давления встречного воздушного потока на оболочку. Длина брусьев

545. При среднем раздутии оболочки продольные брусья должны быть такой длины, чтобы продольная ось рассекала высоту оболочки, или вертикальное расстояние между высшей и низшей ее точками, — пополам. Тогда центр давления встречного воздушного потока будет близок к оси.

546. Для параболического аэростата (414) приблизительно имеем:

$$2s_1 = 2x_1 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{h_1^2}{x_1^2} \right),$$

где $2s_1$ есть длина верхней дуги, а $2x_1$ есть длина оси. Также для нижней дуги получим:

$$2s_2 = 2x_1 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{h_2^2}{x_1^2} \right).$$

По чертежу главного поперечного сечения оболочки, при среднем раздутии (например черт. 16), можем узнать наибольшую высоту оболочки. Разделив ее пополам, получим h_2 . Вычитая отсюда глубину борозды (верхней продольной впадины) найдем h_1 . Теперь, зная длину аэростата, или длину оси $2x_1$, будем иметь все, чтобы по формулам определить длины дуг $2s_1$ и $2s_2$.

Уравнение продольных брусьев сложенного на плоскость металлического аэростата

547. Если параболический мешок складывается вместе с продольными брусьями в плоскость, то на основании последних двух формул получим:

$$s_1 = x_2 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{h_3^2}{x_2^2} \right)$$

и

$$s_2 = x_2 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{h_4^2}{x_2^2} \right),$$

ибо длины дуг s_1 и s_2 и при складывании не изменились; изменились только стрелки h_3 и h_4 и ось $2x_2$. Эти три величины неизвестны и их нужно определить. На помощь имеем третье уравнение:

548. $p = 2(h_3 + h_4)$, так как периметр p среднего поперечного сечения оболочки до и после складывания не изменился.

549. Из уравнений (547) посредством вычитания найдем:

$$x_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{h_4^2 - h_3^2}{s_2 - s_1}.$$

550. Исключая теперь x_2 из первой формулы уравнений (547), получим:

$$s_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{h_4 - h_3}{s_2 - s_1} + \frac{2}{p} \cdot \frac{h_3^2(s_2 - s_1)}{(h_4 - h_3)},$$

так как на основании (548):

$$h_4^2 - h_3^2 = (h_4 + h_3)(h_4 - h_3) = \frac{p}{2} \cdot (h_4 - h_3).$$

551. С помощью (548) из этого уравнения исключаем h_4 ; тогда найдем:

$$s_1 = \frac{p}{6} \cdot \frac{(p - 4h_3)}{(s_2 - s_1)} + \frac{4}{p} \cdot \frac{h_3^2(s_2 - s_1)}{(p - 4h_3)}.$$

Определяя отсюда h_3 , или верхнюю стрелку сложенного мешка, получим:

$$h_3 = \frac{p[p^2 - 3s_1(s_2 - s_1)]}{2[2p^2 + (s_2 - s_1)^2]} \cdot \left\{ 1 + \sqrt{1 - \frac{[p^2 - 6s_1(s_2 - s_1)][2p^2 + (s_2 - s_1)^2]}{2[p^2 - 3s_1(s_2 - s_1)^2]}} \right\};$$

h_1 , или нижнюю стрелку, получим, если здесь вместо s_1 поставим s_2 , и наоборот.

552. Так как $(s_2 - s_1)^2$ есть малое второго порядка, то, пренебрегая им, вместо последней формулы найдем:

$$h_3 = \frac{p}{4} \left[1 - 3 \frac{s_1}{p} \left(\frac{s_2 - s_1}{p} \right) \right] \cdot \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{\left[1 - 6 \cdot \frac{s_1}{p} \cdot \left(\frac{s_2 - s_1}{p} \right) \right]^2}{\left[1 - 3 \cdot \frac{s_1}{p} \cdot \left(\frac{s_2 - s_1}{p} \right) \right]^2}} \right\}.$$

553. Обозначая здесь $\frac{3s_1}{p} \cdot \left(\frac{s_2 - s_1}{p} \right)$ через k , найдем:

$$h_3 = \frac{p}{4} (1 - k) \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{1 - 2k}{(1 - k)^2}} \right];$$

но так как $(1 - k)^2 = 1 - 2k + k^2$ и (k^2) есть малая второго порядка, то, отбрасывая его, получим:

$$h_3 = \frac{p}{4} (1 - k) = \frac{p}{4} \left\{ 1 - 3 \cdot \frac{s_1}{p} \cdot \left(\frac{s_2 - s_1}{p} \right) \right\}.$$

554. Заменяя тут s_1 через s_2 и обратно, найдем:

$$h_4 = \frac{p}{4} \left\{ 1 + 3 \cdot \frac{s_2}{p} \cdot \left(\frac{s_2 - s_1}{p} \right) \right\}.$$

555. В последних двух уравнениях значение $(s_2 - s_1)$ узнаем из (549); именно:

$$s_2 - s_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{h_2^2 - h_1^2}{x_1}.$$

Дуги же s_2 и s_1 известны по уравнениям (546), периметр p определим по черт. 16 или соответствующей таблице. Остальное известно (черт. 57).

556. Зная стрелки h_3 и h_4 , можем написать и уравнение сложной на плоскость оболочки или, точнее,—уравнение верхних и нижних брусев; именно:

$$y = h_3 \left(1 - \frac{x^2}{x_2^2} \right) \quad \text{и} \quad y = h_4 \left(1 - \frac{x^2}{x_2^2} \right),$$

где x и y — координаты, а $2x_2$ есть новая ось, которая лишь чуть короче прежней $2x_1$. Ее можно легко определить из уравнения (547), из которого получим:

$$557. \quad x_2 = \sqrt{s_1^2 - \frac{2}{3} \cdot h_3^2}.$$

Длина каждого обруча и наклон брусьев к продольной оси

558. Имея уравнения (556) продольных брусьев, имеем также и длину каждого обруча. В первом уравнении y выражает длину обруча сложенной оболочки от оси до верхнего бруса, во втором — то же, но до нижнего бруса; x есть расстояние от центра мешка до обруча. Длину от края до края мешка, или длину полуобруча, найдем, см. (556):

$$(h_3 + h_4) \cdot \left(1 - \frac{x^2}{x_2^2}\right) = \pi \cdot y_1 \cdot \left(1 - \frac{x^2}{x_2^2}\right) = \pi \cdot y = \frac{p}{2} \left(1 - \frac{x^2}{x_2^2}\right),$$

где y и y_1 суть радиусы мешка, раздутого до формы поверхности вращения, p — периметр среднего сечения, а x_2 — длина полуоси сложенного на плоскость мешка, близкая к x_1 и определяемая формулой (557).

559. Наклон продольных брусьев к оси можно проверить величиной производных (556):

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{2h_3 \cdot x}{x_2^2} \quad \text{и} \quad \frac{dy}{dx} = -\frac{2h_4 \cdot x}{x_2^2}.$$

Первая формула относится к верхнему брусу, вторая — к нижнему.

Площадь поперечного сечения продольных брусьев и их вес
в случае переменного сечения

(крепостью оболочки пренебрегаем; моменты тяжести и подъемной силы газа равны)

560. Гл. IX и X содержат все данные для решения вопросов о величине поперечного сечения продольных брусьев при известном материале и пренебрежении крепостью оболочки. Мы рассмотрим простейший случай (469), когда моменты тяжести и подъемной силы газа во всяком сечении аэростата равны и потому, будучи противоположны, взаимно уничтожаются. Тогда на брусья будут действовать только силы упругости газа, наполняющего металлический мешок.

На основании (456) и (468) найдем, что на верхние брусья будет действовать сила:

$$\pi \cdot a \cdot y^2 \left(y_3 + y_1 + \frac{1}{4} y \right),$$

а на нижние — сила:

$$\pi \cdot a \cdot y^2 \cdot \left(y_3 + y_1 - \frac{1}{4} y \right).$$

561. Не забудем, что большое влияние на натяжение брусьев имеет и степень продольной натянутости волнистой поверхности аэростата, действующей в обратном направлении и потому уменьшающей натяжение брусьев. Чем эта натянутость больше,

тем меньше будет сила, растягивающая брусья. При настоящем расчете мы пренебрегаем упругостью гофрированной поверхности мешка и предполагаем, что сила газов действует исключительно на продольные массивные части воздушного корабля.

562. Временное сопротивление разрыву при единице площади поперечного сечения обозначим через K , а допускаемое напряжение—через k . Степень надежности, или прочности, детали выразится через $\frac{K}{k} = n$. Теперь для определения поперечного сечения верхних и нижних брусьев, будем иметь формулы:

$$\pi \cdot a \cdot y^2 \cdot \left(y_3 + y_1 + \frac{1}{4} y \right) \cdot \frac{n}{K}$$

и

$$\pi \cdot a \cdot y^2 \cdot \left(y_3 + y_1 - \frac{1}{4} y \right) \cdot \frac{n}{K}.$$

563. Если положим тут $y = y_1$, то получим наибольшие площади среднего сечения брусьев; именно:

$$\pi \cdot a \cdot y_1^2 \cdot \left(y_3 + \frac{5}{4} y_1 \right) \cdot \frac{n}{K} \quad \text{и} \quad \pi \cdot a \cdot y_1^2 \cdot \left(y_3 + \frac{3}{4} y_1 \right) \cdot \frac{n}{K}.$$

564. Вес верхних брусьев переменного сечения выразится интегралом:

$$\pi \cdot c_{БР} \cdot a \cdot \frac{n}{K} \int y^2 \left(y_3 + y_1 - \frac{1}{4} y \right) ds.$$

Также вес нижних брусьев:

$$\pi \cdot c_{БР} \cdot a \cdot \frac{n}{K} \int y^2 \left(y_3 + y_1 + \frac{1}{4} y \right) ds,$$

где $c_{БР}$ есть плотность материала брусьев.

565. Еще проще определить вес верхних и нижних брусьев вместе. Сумма площадей верхних и нижних сечений будет, см. (562):

$$2 \cdot \pi \cdot a \cdot y^2 \cdot \left(y_2 + y_1 \right) \cdot \frac{n}{K}.$$

Отсюда видно, что толщина и ширина брусьев в среднем пропорциональна y или диаметру $2y$ сечения в одном и том же воздушном корабле.

566. Вес всех продольных брусьев выразится приблизительно *:

$$2\pi \cdot c_{БР} \cdot a \cdot (y_3 + y_1) \cdot \frac{n}{K} \int y^2 \cdot dx.$$

* Ошибка, от того что мы приняли dx вместо ds , уменьшает вес брусьев менее, чем на $\frac{1}{3} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2}$, т. е. на довольно незначительную часть определяемой величины.

Так как $y = y_1 \cdot \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)$, то, интегрируя, получим:

$$\int y^2 \cdot dx = y_1^2 \cdot x \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{x^2}{x_1^2} + \frac{x^4}{5x_1^4}\right).$$

Если $x = x_1$, то

$$\int y^2 dx = \frac{8}{15} y_1^2 \cdot x_1$$

и тогда *полный* вес брусьев найдем:

$$\frac{32}{15} \cdot \frac{n}{K} \cdot \pi \cdot c_{BP} \cdot a \cdot (y_3 + y_1) \cdot y_1^2 \cdot x_1.$$

567. Значит, вес брусьев возрастает с увеличением давления y_3 в низшей точке оболочки. Давление y_3 постоянно изменяется по мере расширения или сжатия внутреннего газа. Предохранительный клапан можно поставить, например, так, чтобы давление y_3 в низшей точке не превышало y_1 . При таком давлении даже среднее поперечное сечение весьма расширяется и приближается к кругу, как увидим далее из таблицы. Но можно поставить клапан и на меньшее давление, например на $\frac{1}{2} y_1$, и тогда сечение еще будет очень полно.

Если положить $y_3 = y_1$, то площадь сечения будет (см. предыдущие формулы):
для верхних брусьев

$$\pi \cdot a \cdot y^2 \cdot \left(2y_1 + \frac{1}{4}y\right) \cdot \frac{n}{K},$$

для нижних—

$$\pi \cdot a \cdot y^2 \cdot \left(2y_1 - \frac{1}{4}y\right) \cdot \frac{n}{K}.$$

568. Наибольшее среднее сечение их будет:

$$\frac{9}{4} \cdot \pi \cdot a \cdot y_1^3 \cdot \frac{n}{K} \text{ и } \frac{7}{4} \cdot \pi \cdot a \cdot y_1^3 \cdot \frac{n}{K}.$$

569. Сумма верхних и нижних сечений, вообще—

$$4\pi \cdot a \cdot y_1 \cdot \frac{n}{K} \cdot y^2.$$

Максимум же этой суммы равен:

$$570. \quad 4\pi \cdot a \cdot \frac{n}{K} \cdot y_1^3.$$

571. Полный вес брусев получим такой, см. (566):

$$\frac{64}{15} \cdot \frac{n}{K} \cdot c_{BP} \cdot a \cdot \pi \cdot y_1^3 \cdot x_1.$$

572. Полагая тут $\frac{x_1}{y_1} = \lambda$, найдем:

$$\frac{64}{15} \cdot \frac{n}{K} \cdot c_{BP} \cdot a \cdot \pi \cdot \lambda \cdot y_1^4,$$

т. е. при постоянной продолговатости λ оболочки вес брусев будет пропорционален четвертой степени размеров y_1 воздушного корабля, между тем как подъемная сила возрастает пропорционально третьей степени. Отсюда видно, что размеры аэростата должны быть ограничены.

Вес продольных брусев в случае постоянного их сечения

573. Ввиду того что аэростат в известных случаях может наклоняться, отчего давление на поднявшемся конце может сильно увеличиться, и ввиду того что внизу, под нижними брусьями, привешивается галлерей, тяжесть которой не может уравновеситься давлением газов, хорошо, как будто, принять сечение бруса постоянным, независимо от близости его части к концам оболочки, и соответствующим наибольшему давлению газов. Тогда, на основании формул (563), получим такой полный вес всех брусев:

$$\pi \cdot c_{BP} \cdot a \cdot y_1^2 \cdot \frac{n}{K} \left\{ \left(y_3 + \frac{5}{4} y_1 \right) \cdot 2s_1 + \left(y_3 + \frac{3}{4} y_1 \right) \cdot 2s_2 \right\},$$

где $(2s_1 + 2s_2)$ есть периметр главного продольного сечения оболочки.

574. Можно положить приблизительно, см. (414):

$$s_1 = s_2 = x_1 \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \frac{y_1^2}{x_1^2} \right);$$

в таком случае вес брусев будет:

$$4 \cdot \pi \cdot c_{BP} \cdot a \cdot y_1^2 \cdot \frac{n}{K} \left(y_3 + y_1 \right) \cdot x_1 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right).$$

575. Еще менее точно—

$$4 \cdot \pi \cdot c_{BP} \cdot a \cdot \frac{n}{K} \cdot x_1 \cdot y_1^2 \left(y_3 + y_1 \right).$$

576. Полагая тут $y_3 = y_1$, найдем:

$$8\pi \cdot c_{BP} \cdot a \cdot \frac{n}{K} \cdot x_1 \cdot y_1^3.$$

577. Формулы (575) и (566) дают нам возможность узнать, во сколько раз вес брусьев постоянного сечения больше веса брусьев переменной толщины. Деля первую формулу на вторую, получим число $15/8$, или $17/8$. Отсюда видно, что вес брусьев переменного сечения почти вдвое меньше, чем постоянного.

Вес обручей постоянного сечения

(Крепостью оболочки пренебрегаем)

578. Если предположить, что гофрированная оболочка аэростата очень тонка, что на крепость ее рассчитывать нельзя, то продольное давление газов должно обрушиться исключительно на обручи. Определим в таком случае вес обручей *постоянной* толщины.

Из гл. X [(486) и далее] мы сделаем следующие выводы о поперечном натяжении оболочки.

а) Наибольшее натяжение в каждом поперечном сечении находится в высшей точке этого сечения.

б) В главном поперечном сечении натяжение больше, чем в других сечениях.

в) Из того и другого следует, что наибольшее поперечное натяжение в данной оболочке находится в высшей точке среднего сечения.

Это натяжение выразится *точно* формулой

$$t_z = \frac{a}{2} \cdot (h - h_1) \cdot (h + h_1 + 2b)$$

[см. черт. 15 и формулы (498)].

579. Здесь под h надо подразумевать высоту оболочки, или вертикальное расстояние между ее высшей и низшей точками (черт. 15).

580. Принимая это наибольшее натяжение для *всех* обручей, мы и площадь их поперечного сечения должны принять постоянной. Она будет равна (561):

$$\frac{a}{2} \cdot (h - h_1) \cdot (h + h_1 + 2b) \cdot \frac{n}{K}.$$

Не забудем, что натяжение относится к единице ширины полосы поперечного сечения. Поэтому формула выражает площадь сечения таких обручей, которые расположены друг от друга на расстоянии единицы. Ясно, что *полный вес обручей не зависит от того, часто или редко они размещены на оболочке*, потому что во сколько раз площадь сечения обруча будет меньше, во столько раз число их будет больше.

581. Если возьмем поперечную полосу оболочки шириной и

длиной в единицу, то вес обруча, приходящегося на единицу поверхности оболочки, выразится, см. (580):

$$c_o \cdot \frac{a}{2} \cdot (h - h_1) \cdot (h + h_1 + 2b) \cdot \frac{n}{K},$$

где c_o есть плотность материала обручей.

582. Вес же всех обручей, очевидно, выразится произведением этой величины на полную поверхность оболочки $2F_1$, см. (386); таким образом получим:

$$\frac{4}{3} \pi \cdot c_o \cdot a \cdot (h - h_1) \cdot (h + h_1 + 2b) \cdot y_1 \cdot x_1 \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right) \cdot \frac{n}{K}.$$

583. Эта формула весьма точно выражает вес обручей постоянного сечения. Но можно еще другим способом, хотя и менее точно, определить вес обручей.

Среднее давление на единицу площади какого бы то ни было сечения, см. (486), равно $(y_3 + y_1) \cdot a$. Давление на обруч в единицу ширины, в среднем сечении оболочки будет: $a \cdot (y_3 + y_1) \cdot y_1$. Площадь его поперечного разреза равна:

$$a \cdot y_1 (y_3 + y_1) \cdot \frac{n}{K}.$$

584. Следовательно, вес всех обручей будет (582):

$$\frac{8}{2} \cdot \pi \cdot c_o \cdot a \cdot x_1 \cdot y_1^2 (y_3 + y_1) \cdot \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right) \cdot \frac{n}{K}.$$

585. Полагая тут $y_3 = y_1$ и $\frac{x_1}{y_1} = \lambda$, найдем:

$$\frac{16}{3} \pi \cdot c_o \cdot a \cdot \lambda \cdot y_1^4 \left(1 + \frac{2}{5\lambda^2} \right) \cdot \frac{n}{K}.$$

Отсюда видим, что и вес обручей возрастает пропорционально четвертой степени размера воздушного корабля (подобно изменяющего форму).

Вес обручей переменного сечения

(Крепостью оболочки пренебрегаем)

586. Ввиду того что оболочка в поперечном направлении — по направлению обручей — представляет прекрасное сопротивление давлению газов, мы можем принять и переменную величину сечения обручей, соответствующую истинному давлению газов.

Среднее давление, см. (486) и далее, на единицу площади любого сечения равно $a \cdot (y_3 + y_1)$; давление на обруч в единицу ширины будет: $a \cdot (y_3 + y_1) \cdot 2y$; среднее натяжение этого обруча сверху или снизу равно: $a \cdot (y_3 + y_1) \cdot y$. Площадь его сечения будет:

$$a \cdot (y_3 + y_1) \cdot y \cdot \frac{n}{K}.$$

587. Дифференциал *полного веса* обручей приблизительно равен:

$$a \cdot (y_3 + y_1) \cdot y \cdot \frac{n}{K} \cdot 2\pi y \cdot c_0 \cdot dx.$$

Следовательно, вес обручей будет:

$$2\pi \cdot c_0 \cdot a \cdot \frac{n}{K} (y_3 + y_1) \cdot \int y^2 dx.$$

588. Мы пришли к известной формуле (566), выражающей вес продольных брусев. Отсюда видно, что вес всех обручей выражается такой же точно формулой, как и вес брусев (566), т. е.

$$\frac{32}{15} \cdot \frac{n}{K} \cdot \pi \cdot c_0 \cdot a \cdot (y_3 + y_1) y_1^2 \cdot x_1.$$

При $y_3 = y_1$ и при $\frac{x_1}{y_1} = \lambda$ получим:

$$\frac{64}{15} \cdot \frac{n}{K} \cdot \pi \cdot c_0 \cdot a \cdot \lambda \cdot y_1^4.$$

589. Мы здесь приняли, что натяжение одного и того же обруча постоянно и равно среднему натяжению; но и, на самом деле, наибольшее натяжение лишь немного отличается от наименьшего. По формуле (468) найдем такое отношение натяжений при $y_3 = y_1$:

$$\left(1 + \frac{y}{8y_1}\right) : \left(1 - \frac{y}{8y_1}\right).$$

Отсюда видим, что чем меньше радиус сечения y , тем ближе это отношение к единице. Для главного поперечного сечения отношение будет наибольшим, но и тут только достигнет величины $\frac{9}{7}$. Следовательно, верхнее натяжение больше среднего на $\frac{1}{7}$, а нижнее—на столько же меньше. Можно сообразно этому отношению верхнюю часть каждого обруча делать на $\frac{1}{7}$ толще нижнего.

590. Впрочем, ввиду применения упрощенных формул для давления газов при вычислении натяжения обручей, истинное натяжение, по крайней мере, в $\frac{5}{4}$ раза больше принятого здесь,

почему и нет особенной надобности каждый обруч делать переменной толщины.

Для проверки этого служат формулы (488) и (498).

591. Формулы (584) и (588) дают нам возможность узнать, во сколько раз вес обручей постоянного сечения больше веса обручей переменной толщины. Откидывая в первой формуле множитель $\left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2}\right)$, близкий к единице, и деля ее на вторую, найдем число $\frac{5}{4}$. Следовательно, постоянное сечение обручей увеличивает вес их только на $\frac{1}{4}$ веса переменных обручей.

Сопротивление оболочки — поперечное и продольное. Вес ее

592. Временное поперечное сопротивление оболочки на протяжении dx приблизительно будет: $K \cdot \delta_{OB} \cdot dx$; среднее же натяжение от давления газов на нее выразится (586):

$$a \cdot (y_3 + y_1) \cdot y \cdot dx.$$

Отношение сопротивления материала к действующей силе будет:

$$\frac{\delta_{OB} K}{a \cdot (y_3 + y_1) \cdot y} = n.$$

Отсюда видно, что эта прочность n обратно пропорциональна диаметру y поперечного сечения. *Итак, если в среднем поперечном сечении прочность n достаточна, то в других — меньших — и по-прежнему (при постоянной, конечно, толщине δ_{OB} оболочки).*

593. Из последней формулы найдем:

$$\delta_{OB} = a \cdot (y_3 + y_1) \cdot y \cdot \frac{n}{K},$$

т. е. в случае переменного сечения оболочки толщина ее будет прямо пропорциональна диаметру $2y$ сечения данного воздушного корабля.

594. Если же положить толщину оболочки постоянной, то в этой формуле надо положить $y = y_1$; найдем:

$$\delta_{OB} = a \cdot (y_3 + y_1) \cdot y_1 \cdot \frac{n}{K}.$$

595. Допуская еще, что $y_3 = y_1$, найдем:

$$\delta_{OB} = 2a \cdot y_1^2 \cdot \frac{n}{K},$$

т. е. *толщина оболочки азростата возрастает пропорционально квадрату его размеров в высоту y_1 .*

596. Вес оболочки *постоянной* толщины, удовлетворяющей достаточной прочности n в поперечном направлении, получим, если поверхность ее умножим на толщину δ_{OB} ее и плотность c_{OB} .

Предполагая, что оболочка имеет форму поверхности вращения, найдем, что полная поверхность ее выразится формулой (386):

$$2F_1 = \frac{8}{3} \pi \cdot y_1 \cdot x_1 \cdot \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right).$$

Но оболочка и в надутом виде покрыта волнами, поэтому мы в формулу (386) должны ввести поправочный коэффициент; кроме того, часть ее поверхности поглощается спайкой, но зато часть оболочки замещается довольно широкими обручами. Все поправки мы выразим одним множителем η , который лишь чуть больше единицы, а может быть, и равен ей.

Стало быть, вес оболочки на основании предыдущего и формулы (594) будет:

$$\frac{8}{3} \pi \cdot \eta \cdot c_{OB} \cdot a \cdot x_1 \cdot y_1^2 \cdot (y_3 + y_1) \cdot \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right) \frac{n}{K}.$$

597. Полагая тут $y = y_1$ и $\frac{x_1}{y_1} = \lambda$, найдем:

$$\frac{16}{3} \pi \cdot \eta \cdot c_{OB} \cdot a \cdot \lambda \cdot y_1^4 \cdot \left(1 + \frac{2}{5 \cdot \lambda^2} \right) \cdot \frac{n}{K}.$$

Следовательно, *вес оболочки постоянной толщины, как и обручей, пропорционален четвертой степени* размеров корабля при подобном изменении его формы.

Мало того, сравнивая формулу (596) с (584), мы видим, что вес обручей и оболочки почти одинаков, ибо отношение η весьма близко к единице.

598. *Вес оболочки переменной толщины с точки зрения достаточного поперечного ее сопротивления, очевидно, выражается той же формулой, как и вес обручей переменного сечения (588), или вес продольных брусев переменной толщины (584).*

Но вот вопрос: будет ли оболочка, рассчитанная на достаточное поперечное сопротивление, достаточно крепка и в продольном направлении?

599. Если бы она не образовывала никаких складок и была гладка в продольном направлении, то было бы нетрудно подсчитать ее прочность в этом направлении. Действительно, в таком случае временное сопротивление какого-нибудь поперечного сечения продольному натяжению будет:

$$2\pi \cdot y \cdot \delta_{OB} \cdot K.$$

Давление газов на то же сечение равно:

$$a \cdot (y_3 + y_1) \cdot (\pi \cdot y^2).$$

Следовательно, средняя прочность сечения будет:

$$n = \frac{2 \cdot \delta_{об} K}{a(y_3 + y_1) \cdot y},$$

т. е. она как раз вдвое более в продольном направлении, чем в поперечном, см. (592).

Но дело в том, что благодаря складкам в продольном направлении сопротивление в этом направлении зависит не только от толщины оболочки и крепости материала, но и от формы волн, величины их, крутизны и, вообще, от степени натяжения, что, в свою очередь, зависит и от того, насколько форма поперечного сечения отклонилась от математической формы сечения, определенной в гл. VI, при предположении, что продольное натяжение близко к нулю. Вопрос этот весьма сложен и для соображений по этой части полезны формулы гл. VII (332—341).

Но все-таки нам кажется, что это натяжение, при благоприятных условиях не менее $\frac{1}{2}$ того, которое представляет гладкая оболочка, и потому прочность ее и в продольном направлении не менее, чем в поперечном.

600. Резюмируем наши вычисления относительно веса массивных частей азростата и оболочки.

а) Вес оболочки *постоянной* толщины выражается той же формулой, как и вес обручей *постоянной* площади поперечного сечения (581) и (596).

б) То же можем сказать и про веса оболочки и обручей *переменной* сечения (606), удовлетворяющих достаточной прочности.

в) Веса эти (б) также порознь равны и весу продольных брусьев *переменной* толщины (583).

г) Вес обручей или вес оболочки постоянной толщины в $1\frac{1}{4}$ раза больше их веса при переменной толщине.

д) Вес продольных брусьев в случае постоянной площади их сечения в $1\frac{7}{8}$ раза больше их веса при уменьшении их толщины к концам оболочки.

е) Оболочка, прочность которой удовлетворительна в поперечном направлении, при благоприятных условиях достаточно крепка и в продольном направлении.

ж) Вес оболочки и массивных деталей азростата, подобно изменяющего свою форму, возрастает пропорционально *четвертой* степени увеличения его линейных размеров. Если же высота оболочки и длина ее возрастают непропорционально, то увеличение веса будет пропорционально длине $2x_1$ и кубу высоты $(2y_1)^3$. Вообще пропорционально $x_1 y_1^3$.

з) Обозначая вес обручей переменной толщины через G и пренебрегая прочностью металлической оболочки, найдем, что вес переменных обручей вместе с весом переменных брусьев будет равен $2G$.

и) Вес постоянных обручей и постоянных брусьев будет:

$$\frac{5}{4} G + \frac{15}{8} G = \frac{25}{8} G,$$

т. е. в $1\frac{9}{16}$ раза больше, чем в предыдущем случае з).

к) Вес постоянных обручей и переменных брусьев будет:

$$\frac{5}{4} G + G = \frac{9}{4} G,$$

т. е. лишь в $\frac{9}{8}$ раза больше, чем в случае з).

л) Уничтожая массивные части или делая их легкими и пренебрегая в таком случае их весом, найдем, что вес оболочки *переменной* толщины, удовлетворяющей требованию достаточной прочности, будет равен G , а *постоянной* равен $\frac{5}{4} G$.

м) Вес постоянной оболочки и переменных продольных брусьев (обручи выкинуты) будет:

$$\frac{5}{4} G + G = \frac{9}{4} G = 2 \frac{1}{4} G.$$

н) Вес постоянной оболочки, постоянных обручей и переменных брусьев будет:

$$\frac{5}{4} G + \frac{5}{4} G + G = 3 \frac{1}{2} G.$$

Прочность такой оболочки, конечно, удваивается сравнительно с з) и, кроме того, такой азростат может безопасно и сильно наклоняться. Поэтому, уменьшая вес оболочки и массивных деталей вдвое, получим в сумме весов только

$$\frac{7}{4} G = 1 \frac{3}{4} G.$$

о) Итак, откидывая G , получим последовательно ряд следующих коэффициентов для выражения веса деталей и оболочки:

$$2, 3 \frac{1}{8}, 2 \frac{1}{4}, 1, 1 \frac{1}{4}, 2 \frac{1}{4}, 3 \frac{1}{2}, 1 \frac{3}{4}.$$

Вес оболочки постоянной толщины, когда сопротивлением ее пренебрегают

601. В таком случае вес оболочки выразится формулой:

$$2F \cdot \eta \cdot c_{OB} \cdot \delta_{OB},$$

где $2F$ есть поверхность раздутой оболочки по формуле (386):

$$2F = \frac{8}{3} \pi \cdot y_1 \cdot x_1 \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right).$$

Остальные величины последовательно обозначают: коэффициент поверхности η , немного больший единицы, плотность материала c_{OB} и толщину δ_{OB} оболочки.

Вес цилиндрических продольных полос оболочки сверху и снизу, при их постоянной ширине

602. Сумма весов двух почти одинаковых гладких, продольных полос прямоугольной формы будет:

$$c_{II} \cdot (2s_1 + 2s_2) \cdot e_{II} \cdot \delta_{II},$$

где c_{II} — плотность материала полосы, s_1 и s_2 — длина продольных полос, e_{II} — ширина полосы, δ_{II} — толщина полосы.

603. Приблизительно можем положить, что $2s_1 + 2s_2 = 4x_1$, а потому вес полосы будет: $4c_{II} \cdot x_1 \cdot e_{II} \cdot \delta_{II}$.

Если еще ширину полосы считать равной ширине ладьи и пропорциональной размерам аэростата в высоту $2y_1$, т. е. $e_{II} = \frac{y_1}{m}$, то вес полос выразится:

$$\frac{4}{m} \cdot \frac{x_1}{y_1} \cdot y_1^2 \cdot c_{II} \cdot \delta_{II} = \frac{4}{m} \cdot x_1 \cdot y_1 \cdot c_{II} \cdot \delta_{II},$$

где m есть постоянное.

Можно также принимать вес полос равным определенной части веса оболочки с обручами.

Вес главных вертикальных стержней-цепей

604. Вес ладьи со всем содержимым обыкновенно составляет около половины полной подъемной силы аэростата. Поэтому, предполагая цепи и стержни отвесными и принимая натяжение их равным половине подъемной силы корабля, составим такое уравнение:

$$\frac{1}{2} \cdot a \cdot U = \frac{K}{n} \cdot f.$$

Здесь a есть разность плотностей наружного и внутреннего газов, U — объем газа или газоместилща, K — коэффициент сопротивления материала цепей, n — степень принятой их прочности и f — сумма площадей нормальных сечений стержней, цепей или тросов.

605. Обозначая через c_{CT} плотность их материала, а через e_{CT} наибольшее вертикальное расстояние между высшей точкой оболочки и полом ладьи, найдем, что вес этих тяжей не может превышать $c_{CT} \cdot f \cdot e_{CT}$. Добавляя к числу отвесных цепей и параболические, можем положить, на основании формулы этой и предыдущей, что вес всех их приблизительно равен:

$$\frac{n}{2K} \cdot a \cdot U_{CT} \cdot c \cdot e_{CT}.$$

Вес пассажиров и двигателей

606. Пусть вес пассажиров составляет определенную часть $k_{\text{д}}$ подъемной силы $a \cdot U$ корабля; тогда вес их выразится: $k_{\text{д}} \cdot a \cdot U$. Также пусть и вес двигателей составляет определенную часть $k_{\text{д}}$ подъемной силы; их вес будет $k_{\text{д}} \cdot a \cdot U$.

Вес ладьи, рулей и гребных винтов

607. Так как вес ладьи пропорционален весу пассажиров, двигателей и т. п., т. е. пропорционален подъемной силе, то можем положить ее вес: $k_{\text{д}} \cdot a \cdot U$, где $k_{\text{д}}$ есть некоторая часть подъемной силы, ассигнованная на ладью.

608. Полагая форму аэростата постоянной, можем считать, как в морском деле, что поверхность рулей и гребных винтов, в отдельности и порознь, составляет определенную часть сечения оболочки, иначе сказать, — поверхность их пропорциональна поверхности корабля.

Если скорость подобно изменяющегося аэростата должна быть *постоянной*, то и давление на рули и винт в среднем будет также пропорционально поверхности корабля. Момент этого давления будет уже пропорционален его объему. Когда средняя толщина рулей и пр. будет пропорциональна размерам корабля, то момент их сопротивления, так же как и момент давления на них встречного воздушного потока, будет пропорционален кубу линейных размеров корабля, или объему его. Итак, момент сопротивления будет тогда соответствовать моменту давления и потому вес рулей, винтов и т. п. будет пропорционален объему и потому выразится: $k_{\text{у}} \cdot a \cdot U$, где $k_{\text{у}}$ есть некоторая часть подъемной силы, идущая на органы управления.

609. Мы положили, что сила двигателей пропорциональна подъемной силе корабля, т. е. кубу его размеров. Отсюда видно, что давление на рули и винты возрастает быстрее квадрата размеров корабля или его поверхности. Поэтому при таких условиях, когда скорость корабля *возрастает* с его размерами, вес органов управления должен бы возрасти быстрее куба размеров. Чтобы избежать последнего, надо органы управления делать из менее плотного и более крепкого материала, например, из алюминия или стальных труб; наконец, можно употребить несколько винтов. Вообще при некотором искусстве можно не изменять положение, по которому вес рулей и гребных винтов пропорционален подъемной силе корабля.

Черная внутренняя труба для нагревания легкого газа

610. Черная металлическая труба, помещенная внутри оболочки аэростата (черт. 1) и нагревающая водород, может быть сделана из такого материала и с таким расчетом, чтобы не прогорать и поддерживать тем большую разность температур между внешним воздухом и внутренним газом, чем размеры корабля

больше. Среднюю толщину листов, из которых сделана труба, можно считать постоянной или лишь немного возрастающей с размерами корабля; поверхность труб можно положить пропорциональной поверхности или, в крайнем случае, объему аэростата. Отсюда видно, что вес труб не может возрастать быстрее подъемной силы корабля; а потому щедро положим для веса нагревающих труб: $k_{TP} \cdot a \cdot U$ *.

Толщина материала данной трубы должна быть, конечно, сообразна температуре ее частей.

В начале, в том месте трубы, где входят в нее горячие продукты горения, не успевшие еще остыть, — она должна быть массивнее, далее же листы могут быть тоньше.

611. Нам еще осталось определить вес сцеплений, клапанов, крышки для ладьи, вес регуляторов, блоков, якорей, галлерей, сидений и множества принадлежностей, механизмов и предметов комфорта и необходимости. Вес топлива пока не принимаем в расчет, имея в виду газовые моторы, потребляющие газ из оболочки аэростата.

Положим, что вес всех не принятых в расчет частей пропорционален подъемной силе корабля; тогда он будет равен: $k_{HP} \cdot a \cdot U$, где k_{HP} есть некоторая часть подъемной силы, предназначенная на принадлежности и запас.

612. В предыдущие формулы входит величина U , т. е. объем легкого газа. По (389) мы знаем, что

$$2U_1 = \frac{16}{15} \pi \cdot y_1^2 x_1.$$

Но, с одной стороны, это — объем аэростата, надутого до формы тела вращения, т. е. чересчур большой; с другой стороны, он мал, так как должен быть увеличен на промежуточный продолговатый цилиндр (черт. 1 и 3).

В общем, ввиду того что объем добавочного цилиндра пропорционален объему аэростата, можно принять для полного объема:

$$U = 2U_1 \cdot k_U = \frac{16}{15} k_U \cdot \pi \cdot y_1^2 x_1,$$

где k_U — близко к единице.

ХIII. Уравнения размеров оболочки аэростатов в высоту

Считаем не лишним сказать предварительно несколько слов о значении размеров аэростата **.

Чем эти размеры больше, тем солиднее конструкция металлической оболочки аэростата и тем более он управляем. Только

* В дальнейшем труба для подогревания газа автором помещается не внутри, а снаружи, и примыкает снизу к оболочке аэростата; это не меняет изложенных выводов.

Аэростатом автор называет управляемый аэростат.

Прим. ред.
Прим. ред.

при значительных размерах польза от аэронаута превзойдет выгоды от мореплавания. Еще Жиффар (родился в 1825, умер в 1882 г.) прекрасно понимал значение больших размеров аэронаута. Несмотря на то что Жиффар был практическим деятелем, нажившим миллионы на своих паровых машинах, насосах и аэростатах, — он собирался строить аэронаут в 220 000 м³ вместимости.

Мы никак не можем считать Жиффара профаном в воздухоплавании или мечтателем; не даром же он построил привязной баллон в 25 000 м³. Воздухоплаванием он интересовался с юности; его управляемые аэронауты всем известны и составили эпоху в аэронавтике. Слепота и смерть помешали этому гениальному человеку, оставившему все свое состояние беднякам Парижа и ученым обществам, продолжать свою плодотворную деятельность над управляемым аэростатом. Что было бы, если бы воскрес этот гений, этот рабочий-самоучка и воспользовался для своих планов теперешней могущественной техникой, теперешними двигателями Левасера, дающими чуть не лошадиную силу на кг своего веса! * Проектированный Жиффаром аэронаут имел объем в два с лишком раза больше объема моего металлического аэронаута на 200 пассажиров.

Итак, да, не страшат нас большие размеры металлических оболочек воздушных кораблей: они будут даже больше, чем думал Жиффар.

Малые аэронауты не только невыгодны в материальном отношении, но и металлическая оболочка их не будет достаточно солидна.

Однако они могут играть роль как средство на практике изучить способы построения металлических оболочек. Они также будут служить переходной ступенью к громадным воздушным кораблям, как малое неработоспособное дитя вырастает в полезного работника.

613. Мы имеем данные, по которым можем вычислить наибольшие размеры оболочки в высоту. Главное основание для этого — вес оболочки и ее массивных частей.

По (600) вес этот может быть весьма различен. Вот случай, имеющие некоторое практическое или теоретическое значение. Мы их примем за основание при составлении уравнений высоты.

а) Оболочка *переменной* толщины, но рассчитанная так, чтобы выдерживать продольное и поперечное давления газов и другие разрушающие силы. Весом и сопротивлением брусьев и обручей пренебрегаем.

Тогда вес оболочки примем равным G (см. резюме (600), которое нужно иметь в виду и далее).

б) То же, но оболочка *постоянной* толщины, которая изменяется лишь с размерами воздушного корабля. Вес ее будет $\frac{5}{4} G$.

* В начале XX века. В настоящее время имеются авиационные моторы, дающие до 3 л. с. на 1 кг. Прим. ред.

в) То же, т. е. оболочка *постоянной* толщины для данного аэростата; сопротивлением брусьев и обручей пренебрегаем, но вес их пропорционален подъемной силе корабля; это значит, что толщина их во всех направлениях пропорциональна размерам корабля. Вес оболочки тогда будет:

$$\frac{5}{4} \cdot G + a \cdot U \cdot k_{B,O},$$

где ($k_{B,O}$) есть часть подъемной силы ($a \cdot U$), уделаемая на брусья с обручами.

г) Продольные брусья *переменной* толщины и оболочка *постоянной* толщины разделяют пополам сопротивление продольным силам. Обручей нет. Их заменяет сама оболочка. Вес продольных брусьев принимаем половинный $\left(\frac{1}{2} \cdot G\right)$; вес оболочки нормальный $\left(\frac{5}{4} \cdot G\right)$. Тогда вес оболочки с продольными брусьями выразится:

$$\frac{5}{4} \cdot G + \frac{1}{2} \cdot G = \frac{7}{4} \cdot G.$$

д) То же самое, но вес оболочки вдвое менее $\left(\frac{5}{8} G\right)$, но зато присоединяются обручи *постоянной* толщины и *постоянного* веса $\left(\frac{5}{8} G\right)$. Вес оболочки с продольными брусьями и обручами тогда выразится:

$$\frac{1}{2} \cdot G + \frac{5}{8} \cdot G + \frac{5}{8} \cdot G = \frac{7}{4} \cdot G,$$

т. е. вес будет тот же.

614. Все описанные случаи применимы только к очень большим аэронатам, когда оболочка оказывается достаточной толщины. При малых размерах корабля оболочка получается непрактично тонка и потому невозможна.

Тогда и вообще, для всех размеров, можно принять оболочку постоянной толщины — велик или мал воздушный корабль.

е) Для малых размеров аэростатов достаточно принимать вес брусьев и обручей пропорциональным подъемной силе корабля (613, в); он будет равен: $a \cdot U \cdot k_{B,O}$. Вес одной оболочки известен из (601).

ж) При больших размерах воздушных кораблей, напротив, можно пренебречь сопротивлением оболочки и противопоставить разрушающим ее силам брусья и обручи. Принимая сечение брусьев переменным, как обыкновенно, а сечение обручей постоянным, найдем, что полный их вес будет (600): $G + \frac{5}{4} \cdot G = \frac{9}{4} \cdot G$.

К этому следует еще прибавить вес оболочки, согласно (601).

В этой формуле содержится и вес продольной вставной полосы оболочки, которой может и не быть (черт. 1—7). Там, где оболочка играет роль как сопротивляющийся материал, можно положить, что вес этой полосы равен $G \cdot b$, где b есть часть (конечно, меньше единицы), уделяемая на вставную полосу.

615. Итак, вес A оболочки с обручами, брусьями и вставной полосой b , по порядку, в разных случаях — от а) до ж) — будет:

$$\text{а) } A = G \cdot (1 + b),$$

$$\text{б) } A = G \cdot \left(\frac{5}{4} + b \right),$$

$$\text{в) } A = G \cdot \left(\frac{5}{4} + b \right) + a \cdot U \cdot k_{O,B},$$

$$\text{г) } A = G \cdot \left(\frac{7}{4} + b \right),$$

$$\text{д) } A = G \cdot \left(\frac{7}{4} + b \right).$$

$$\text{е) } A = a \cdot U \cdot k_{B,O} + \frac{8}{3} \cdot \pi \cdot y_1 \cdot x_1 \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right) \cdot \eta \cdot c_{OB} \cdot \delta_{OB},$$

$$\text{ж) } A = \frac{9}{4} \cdot G + \frac{8}{3} \cdot \pi \cdot y_1 \cdot x_1 \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right) \cdot \eta \cdot c_{OB} \cdot \delta_{OB}.$$

616. Основание для составления уравнений высоты оболочки состоит в том, что вес всех тяжестей корабля равен его подъемной силе $a \cdot U$. Вес остальных тяжестей будет (602—612):

$$a \cdot U (k_{TP} + k_L + k_M + k_Y + k_H + k_{HP}) + G \cdot k_{CT}.$$

Здесь буквы в скобках последовательно выражают коэффициенты — черной трубы k_{TP} , ладьи k_L , моторов k_M , органов управления k_Y , пассажиров k_H и всего остального с запасом k_{HP} .

617. k_{CT} есть вес вертикальных главных стержней-цепей. Он известен из (605). Если в этой формуле положим $l_{CT} = k_l \cdot y_1$, то вес этот будет:

$$G \cdot k_{CT} = \frac{n}{K} \cdot a \cdot U \cdot c_{CT} \cdot k_l \cdot y_1,$$

т. е. он будет пропорционален четвертой степени размеров y_1 аэростата в высоту, так как U пропорционально кубу y_1 . Значит, он возрастает пропорционально G , т. е. k_{CT} есть постоянный коэффициент, выражающий известную часть веса оболочки G переменной толщины.

618. Общее уравнение высоты оболочки, на основании предыдущего, будет:

$$A + G \cdot k_{CT} + a \cdot U (k_{TP} + k_L + k_M + k_Y + k_H + k_{HP}) = a \cdot U.$$

Этим мы выражаем, что вес обмотки A с главными стержнями $G \cdot k_{CT}$ и уравновешенной ладьей равен полной подъемной силе корабля за вычетом веса легкого газа $a \cdot U$.

619. Мы не станем сейчас определять вес уравновешенной ладьи и прочих частей корабля:

$$a \cdot U \cdot (k_{TP} + k_L + k_M + k_Y + k_H + k_{PP}).$$

Из предыдущих моих работ видно (например „Простое учение о воздушном корабле“), что этот вес составляет около половины всей подъемной силы корабля. Приняв это, уравнение (618) можем упростить так:

$$A + G \cdot k_{CT} = \frac{1}{2} \cdot a \cdot U.$$

620. A известно из (613), k_{CT} можем определить из (617). Именно:

$$k_{CT} = \frac{n}{2K \cdot G} a \cdot U \cdot c_{CT} \cdot k_l \cdot y_1.$$

621. Отсюда надо исключить U и G ; G узнаем из (588) и (566). Найдем:

$$G = \frac{32}{15} \cdot \frac{n}{K} \cdot \pi \cdot c_{CT} \cdot a \cdot \left(1 + \frac{y_3}{y_1}\right) \cdot y_1^3 \cdot x_1;$$

U известно из (612).

Сделав теперь исключение, получим:

$$k_{CT} = \frac{k_l \cdot k_U}{4 \cdot \left(1 + \frac{y_3}{y_1}\right)}.$$

Например, если

$$\begin{aligned} k_l &= 3, \\ k_U &= 1, \quad y_3 = y_1, \end{aligned}$$

то

$$k_{CT} = \frac{3}{8},$$

т. е. вес цепей составит около $\frac{1}{3}$ веса оболочки переменной толщины.

622. В случаях: а), б), в) и г) уравнение (619) можем написать в виде:

$$G \cdot (k + k_{CT} + b) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot U,$$

где k — постоянный коэффициент в скобках (615), например, в случае а): $A = G(k + b)$ и т. д.

Исключая отсюда U и G , сокращая и определяя y_1 или размеры оболочки в высоту $2y_1$, найдем:

$$y_1 = \frac{k_U \cdot \frac{K}{n}}{4c_{OB} \cdot (k + k_{CT} + b) \cdot \left(1 + \frac{y_3}{y_1}\right)}.$$

623. Отсюда видно, что размер оболочки в высоту $2y_1$ пропорционален крепости k материала и обратно пропорционален принятой прочности n . Он также обратно пропорционален плотности c_{OB} материала, сумме $(k + k_{CT} + b)$, зависящей от конструкции (613) оболочки, и сумме $\left(1 + \frac{y_3}{y_1}\right)$, зависящей от напряжения $\left(\frac{y_3}{y_1}\right)$ газа в нижней точке оболочки.

624. Случай а) (615), когда массивные части оболочки настолько, сравнительно, незначительны, что пренебрегают их весом, имеет мало практического значения. Тут размеры получаются, при прочих одинаковых обстоятельствах, — наибольшие, потому что A или k имеет наименьшую величину.

Итак, полагая, в (621) и (622), $K = 60$ кг на 1 мм² сечения, $n = 6$, $k_U = 1$, $b = 0$, $c_{OB} = 7,5$, $k = 1$, $\frac{y_3}{y_1} = 1$, вычислим $k_{CT} = \frac{3}{8}$ и $y_1 = 121,2$ м, т. е. высота оболочки будет $242,4$ м: немного меньше башни Эйфеля. Но такие размеры совсем необязательны. Так, если прочность n увеличим в 10 раз, то размер уменьшится в 10 раз, т. е. $2y_1$ будет равно 24 м (622).

625. В случае б), сходном почти с предыдущим, но при оболочке постоянной толщины (для данного корабля), при тех же условиях найдем: $y_1 = 102,6$ м, или $2y_1 = 205,2$ м.

626. Обратимся к более практическим случаям г) и д) (613). Тогда

$$k = \frac{7}{4}, \quad y_1 = 78,4 \text{ и } 2y_1 = 156,8 \text{ м.}$$

Это — около половины высоты башни Эйфеля.

627. Интересно знать подъемную силу такого гиганта, толщину продольных брусев и толщину оболочки.

Чтобы иметь об этом понятие, воспользуемся формулой подъемной силы корабля, которая выражается так (612):

$$a \cdot U = \frac{16}{15} \cdot k_U \cdot \pi \cdot y_1^2 \cdot x_1 \cdot a.$$

628. Полагая тут $k_U = 1$, $2y_1 = 150$ м, $\pi = 3\frac{1}{7}$, $x_1 = 7y_1$, $a = 0,001$, вычислим: $a \cdot U = 9900$ т. На пассажиров уделяется не менее одной десятой этой подъемной силы; так что если класть на каждого по 100 кг, то получим 9900 пассажиров.

629. Сумма площадей сечения продольных брусьев в среднем-разрезе оболочки выражается формулой (562):

Для проекта г) и д) эг о сечение будет вдвое меньше (613, а для одного бруса еще вдвое меньше. Принимая его (квадрат) ным, площадью X^2 , найдем такую величину бруса:

$$X = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot a \cdot y_1^2 \cdot (y_3 + y_1) \cdot \frac{n}{K}}.$$

630. Толщина оболочки, удовлетворяющей достаточной прочности $n = 6$ в *поперечном* направлении, — в среднем, выражается формулой (594):

$$\delta_{OB} = a \cdot (y_3 + y_1) \cdot y_1 \cdot \frac{n}{K}.$$

Для проекта г), принимая обыкновенные условия и $2y_1 = 150$ м, вычислим $\delta_{OB} = 1,125$ мм, что все-таки толще кровельного железа (почти втрое).

631. В проекте д) предполагаются обручи. Площадь их поперечного сечения равна площади сечения оболочки. Так что на продольном сечении оболочки, длиной в l , площадь этого сечения (как оболочки, так и обручей) будет δl . Принимая один обруч на каждый метр продольного сечения оболочки и считая обруч квадратным, найдем сторону X этого квадрата:

$$X = \sqrt{\delta_{OB} l}.$$

Полагая тут $\delta_{OB} = 0,562$ мм, $l = 1000$ мм, вычислим $X = 23,7$ мм.

Понятно, что при более редких обручах они будут толще. Обручи можно в сечении делать продолговатыми, тогда они значительно увеличат поверхность оболочки и ее подъемную силу. Так, при продолговатости обручей, равной 9, подъемная сила увеличится на 70%, т. е. чуть не удвоит число пассажиров.

632. Из уравнения (604) найдем:

$$f = \frac{a \cdot U \cdot n}{2K}.$$

Отсюда вычислим для проектов г) и д) площадь поперечного сечения главных стержней-цепей, на которых висит ладья. Именно: $f = 4950$ см². Если положить, что цепи занимают половину длины азростата и находятся друг от друга на 5 м, то найдем, при двойном их ряде, около 260 цепей, каждая с площадью поперечного сечения в 25 см².

633. Уравнение (622) можно выразить более обще, если положить, что на оболочку с ее массивными частями идет не половина, как мы полагали, а другая часть подъемной силы: $a \cdot U$, которую (часть) обозначим через e , т. е.

$$e = 1 - (k_{TP} + k_{Д} + k_M + k_Y + k_{II} + k_{ПР}).$$

Тогда, вместо уравнений (622) получим:

$$G(k + k_{CT} + b) = e \cdot a \cdot U$$

и

$$y_1 = \frac{e \cdot k_U \cdot K}{2 \cdot c_{OB} \cdot n \cdot (k + k_{CT} + b) \cdot \left(1 + \frac{y_3}{y_1}\right)}.$$

Из последнего уравнения видна зависимость между размерами оболочки в высоту $2y_1$ и относительным ее весом e : чем последний больше, тем и y_1 больше.

634. Также вместо формулы (621) приблизительно получим:

$$k_{CT} = \frac{(1 - e) \cdot k_i \cdot k_U}{2 \left(1 + \frac{y_3}{y_1}\right)}.$$

Отсюда видно, что коэффициент веса цепей уменьшается с увеличением относительного веса e оболочки с ее массивными частями.

635. При первом построении аэростатов, конечно, начнут с наименьших размеров. Из формулы (633) видим, что y_1 уменьшается с увеличением прочности n . Следовательно, мы можем строить не только гиганты, но, как будто, и маленькие аэронавы, и еще при этом выгадаем в прочности. Приняв известную прочность n , из (633) определим (y_1), а из (594) можем вычислить и толщину оболочки.

Для проекта а), б) и г) берем полную вычисленную толщину δ , а для проекта д) — половину ее (613).

636. Определяя из (630) прочность n и затем исключая из полученной формулы y_1 посредством уравнения (633), найдем:

$$n = \frac{k_U^2 \cdot a \cdot e^2}{8 \cdot c_{OB} \cdot \delta_{OB} (k + k_{CT} + b)^2 \cdot \left(1 + \frac{y_3}{y_1}\right) \left(\frac{K}{c_{OB}}\right)}.$$

Если принять для некоторых материалов сопротивление разрыву K пропорциональным плотности c_{OB} , то $\left(\frac{K}{c_{OB}}\right)$ можно считать постоянным и тогда найдем, что прочность будет увеличиваться с уменьшением плотности материала c_{OB} оболочки и уменьшением ее толщины δ_{OB} .

637. Так, если бы мы в каком-нибудь проекте (а, б, в, г, д) железо заменили алюминием и толщину оболочки еще уменьшили в 6 раз, то прочность увеличилась бы в 18 раз (алюминий в 3 раза легче железа).

Прочность оболочки естественно увеличивать ввиду ее малой толщины, но ведь вместе с тем увеличивается и прочность n других массивных ее частей, т. е. обручей, продольных брусев, и главных стержней-цепей, что уже совсем непроизводительно.

Зачем же делать, например, запас прочности продольных брусев в 18 раз больше шестикратного, т. е. зачем его доводить до 108?

Поэтому разобранные уравнения высоты оболочки для проектов г) и д) невыгодны, когда хотим строить аэронавта наименьших размеров.

Но для проектов а) и б) они применимы.

638. Так, для проекта б), когда оболочка принимается постоянной толщины, а весом массивных частей пренебрегаем, вычислим по формуле (630), при условиях (625):

$$\delta_{OB} = 2 \text{ мм};$$

$2y_1$ мы приняли в 200 м. Если теперь железо заменим алюминием и толщину оболочки уменьшим в 10 раз, то размеры аэронавта в высоту уменьшатся в 30 раз и будут: $2y_1 = 6,67 \text{ м}$. Алюминиевая оболочка будет толщиной в 0,2 мм, что в $2^{1/2}$ раза меньше толщины кровельного железа.

639. Если мы материал оставим железный, но толщину оболочки уменьшим в 13 с небольшим раз, то размер будет: $2y_1 = 15 \text{ м}$, а толщина оболочки будет: $\delta_{OB} = 0,15 \text{ мм}$.

Такой толщины белая жесть употребительна в продаже. У меня имеется такая жесть в листах около 50 см длины и около 30 см ширины.

Эта жесть весьма солидна и представляет, по-моему, материал, пригодный для постройки неигрушечных аэронавтов, хотя самый проект б) может иметь значение скорее как опыт постройки и в таком случае размер можно довести даже до 2—3 м.

640. Из уравнений (630) и (636), исключая n , найдем произведение $c_{OB} \cdot \delta_{OB}$. Исключая его, в свою очередь, из формулы (636) и определяя n , найдем:

$$n = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{K}{c_{OB}} \right) \cdot \frac{e \cdot k_U}{y_1(k + k_{CT} + b) \cdot \left(1 + \frac{y_3}{y_1} \right)}.$$

Принимая опять отношение $\frac{K}{c}$ приблизительно постоянным для строительных материалов*, видим, что прочность увеличивается пропорционально уменьшению y_1 или размерам аэронавта в высоту. Но, как мы уже говорили, чрезмерная прочность для массивных частей оболочки излишня и невыгодна.

* В самом деле, имеем: для дюрала $\frac{K}{c} = \frac{40}{2,85} = 14$,

„ стали $\frac{K}{c} = \frac{120}{7,85} = 15,5$

„ сосны $\frac{K}{c} = \frac{7}{0,5} = 14$.

641. Коэффициент k_{CT} цепей, как видно из формулы (634), не зависит ни от прочности n , ни от плотности c и толщины δ_{OB} материала, предполагая, разумеется, один и тот же материал и одну и ту же прочность n для всех деталей оболочки.

642. Проектируем еще аэронавт из алюминия системы д), т. е. с обручами и продольными брусками (613) и положим:

$$k_U = 1; a = 0,001; b = 0; c_{OB} = 2,5; A = \frac{7}{4}; \delta_{OB} = 0,2 \text{ мм};$$

$$e = 0,5; K = 20 \text{ кг/мм}^2; k_l = 3; \frac{y_3}{y_1} = 1;$$

тогда вычислим по формулам (633), (634) и (640):

$$k_{CT} = \frac{3}{8}; y_1 = 8,5; n = 55,4.$$

Итак, несмотря на малую толщину оболочки и легкий материал, размеры в высоту $2y_1 = 17 \text{ м}$ оказываются далеко не маленькими. Но прочность громадна, и если она терпима для оболочки ввиду ее точности, то уж никак нетерпима для массивных частей, так как всего драгоценнее для аэронавта экономия веса.

643. Перейдем к проекту в), когда оболочка хотя и предназначена для выдерживания продольных и поперечных сил, стремящихся ее разорвать, но не лишена все-таки и массивных частей, сопротивлением которых пренебрегают и вес которых принимают пропорциональным подъемной силе корабля.

Толщина обручей и брусков будет пропорциональна размерам аэронавта (613).

Уравнение высоты y_1 составим, как и для других проектов, на основании (615), (617), (621) и (627).

Получим:

$$y_1 = \frac{(e - k_{OB}) \cdot k_U \cdot K}{2c_{BO} \cdot n \left(\frac{5}{4} + k_{CT} + b \right) \cdot \left(1 + \frac{y_3}{y_1} \right)};$$

k_{CT} узнаем из (621).

Уравнение это тоже наиболее применимо для гигантских аэронавтов, когда оболочка имеет достаточную толщину и массивные части не имеют излишнего веса и прочности.

644. Положим, что $k_U = 1; k_{OB} = 0,05; K = 60 \text{ кг/мм}^2; b = 0;$

$$n = 6; c = 7,5; y_3 = y_1; l = 0,5; k_l = 3;$$

тогда вычислим:

$$k_{CT} = \frac{3}{8}; y_1 = 92,3 \text{ м}; \delta_{OB} = 1,9 \text{ мм}.$$

Принятая величина k_{OB} означает, что на обручи и брусья отделяется только $1/20$ всей подъемной силы $a \cdot U$ корабля, или $1/10$ веса оболочки с ее массивными придатками и стержнями-цепями.

645. Понятно, что если в последней формуле положим k_{OB} больше, то y_1 будет меньше; но тогда и оболочка будет тоньше [см. формулу (594) или (630)]. Пусть $k_{OB} = 0,25$, а прочее — согласно (644). Тогда $y_1 = 51,54$ м; $k_{CT} = \frac{3}{8}$; $\delta_{OB} = 0,53$ мм.

646. Увеличивая еще массивность брусьев и обручей k , уменьшим еще размеры корабля; толщина оболочки также уменьшается.

В этом проекте в) можем также прочность n увеличить хотя бы в 3 раза. Тогда, согласно (641) и (643), y_1 уменьшается в 3 раза, что по (658) вызовет утонение оболочки в 3 раза. Таким образом найдем: $2y_1 = 34,36$ м; $n = 18$; $\delta_{OB} = 0,177$ мм.

Оболочка недостаточной толщины, да и размеры аэронаута на первое время чрезмерны.

647. По проекту е) (615) оболочка аэронаута так мала по своим размерам, что прочность ее и ее частей считается более чем достаточной. Действительно, из формулы (592) для оболочки постоянной толщины очевидно, что прочность n обратно пропорциональна размерам y_1 аэронаута. И потому на прочность оболочки малой величины, сделанной из обыкновенной поделочной жести, совсем можно не обращать внимания.

Согласно формулам (615) и (618) составим уравнение:

$$a \cdot U \cdot k_{OB} + \frac{8}{3} \pi \cdot y_1 \cdot x_1 \cdot \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right) \cdot \eta \cdot c_{OB} \cdot \delta_{OB} + \\ + G \cdot k_{CT} = a \cdot U \cdot (1 - e).$$

Положим $aUk_{OB} + G \cdot k_{CT} = a \cdot U \cdot k_{OB, CT}$, где $k_{OB, CT}$ есть сумма коэффициентов обручей, брусьев и цепей, причем вес последних мы принимаем пропорциональным подъемной силе aU . Тогда, с помощью этих уравнений, исключая U посредством (627) или (612), получим:

$$y_1 = \frac{\eta \cdot c_{OB} \cdot \delta_{OB} \cdot \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right)}{0,4 \cdot a \cdot k_U \cdot (1 - e - k_{OB, CT})}.$$

648. Полагая тут для примера $\eta = 1$; $c = 2,5$ (алюминий); $\delta_{OB} = 0,2$ мм (в полтора раза тоньше обыкновенной жести); $D = 0,001$; $k_U = 1$; $e = 0,4$; $k_{OB, CT} = 0,2$ и пренебрегая дробью $\left(\frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right)$, найдем: $y_1 = 3^{1/8}$ м и $2y_1 = 6^{1/4}$ м.

Такие аэронаты могут строиться скорее для обучения делу их построения, чем для практических надобностей.

Если толщину δ_{OB} оболочки взять вдвое меньшую, то наибольшая высота оболочки будет только $3\frac{1}{8}$ м. Лист из алюминия даже толщиной в $\frac{1}{12}$ мм кажется наощупь более жестким, чем картон визитных карточек. Для практики в построении может быть предпринята и такая постройка.

Из гофрированного металла строить оболочки малых аэронатов крайне затруднительно, но ничто не мешает строить такие аэронаты из гладких листов, см. (342—346).

649. В то время как проект е) применяется только к небольшим, сравнительно, аэронатам, проект ж), напротив, применяется, главным образом, к огромным кораблям.

В нем брусья, обручи и цепи рассчитаны так, чтобы выдерживать действие разрушающих сил; сопротивление же оболочки не учитывается. Ее толщина определяется соображениями практичности.

Уравнение высоты $2y_1$ будет, см. (615, 618 и 633):

$$G \cdot \left(\frac{9}{4} + k_{CT} + b \right) + \frac{8}{3} \pi \cdot y_1 \cdot x_1 \cdot \left(1 + \frac{y_1^2}{x_1^2} \right) \cdot \eta \cdot c_{OB} \cdot \delta_{OB} = \\ = a \cdot U(1 - e).$$

Исключая отсюда G и U посредством (621) и (612), сокращая и определяя y_1 , получим:

$$y_1 = \frac{A}{2} + \sqrt{\frac{A^2}{4} - B},$$

где

$$\frac{A}{2} = \frac{k_U \cdot (1 - e) \cdot K}{4 c_{OB} \cdot \left(1 + \frac{y_3}{y_1} \right) \cdot \left(\frac{9}{4} + k_{CT} + b \right) \cdot n}$$

и

$$B = \frac{5 \cdot \eta \cdot \delta_{OB} \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right) \cdot K}{4a \cdot \left(1 + \frac{y_3}{y_1} \right) \cdot \left(\frac{9}{4} + k_{CT} + b \right) \cdot n}.$$

650. Положим, тут: $k_U = 1$; $e = 0,5$; $K = 60$ кг/мм²; $c = 7,5$ (железо или сталь); $y_3 = y_1$; $k_{CT} = \frac{3}{8}$, см. (634); $b = 0$; $\delta_{OB} = 0,2$ мм; $n = 6$; $\eta = 1$; $a = 0,001$; дробью $\left(\frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2} \right)$ пренебрегаем.

Тогда вычислим: $y_1 = 54,8$ м и $y_1 = 8,7$ м, т. е. оболочка может быть двух размеров — в 109,6 и в 17,4 м диаметром.

651. Принятая на построение жесть в полтора раза тоньше обыкновенной продажной жести, из которой делают дешевые кружки и пр. В связи с массивными частями оболочки можем считать практичным и железный материал толщиной в 0,15 мм,

также весьма употребительный, образцы которого мной испытаны.

Принимая $\delta_{OB} = 0,15$ мм и условия (650), вычислим по тем же формулам: $y_1 = 57,26$ м и $y_1 = 6,26$ м.

Наименьший диаметр будет около $12\frac{1}{2}$ м, что лишь немного превышает управляемые аэростаты последнего времени (1907) — например Лебоди.

652. Сделаем еще расчет, положив $\delta_{OB} = 0,3$ (обыкновенная белая жель); получим $y_1 = 48,89$ м и $y_1 = 14,61$ м.

Эти размеры чрезмерны для оболочки *первого* аэроната ($2y_1 = 29,22$ м).

653. Для алюминиевой оболочки положим в уравнениях (649) $c = 2,5$ и $K = 20$ кг/мм². Тогда, при условиях (650), но при толщине δ_{OB} в 0,15 мм и 0,30 мм, вычислим $y_1 = 1,93$ м и $y_1 = 61,57$ м (0,15 мм) и $y_1 = 4,00$ м и $y_1 = 59,50$ м (0,30 мм).

Наименьший размер алюминиевого аэроната при оболочке в 0,15 мм, следовательно, едва доходит до 4 м в диаметре.

654. Из (649) видно, что $\frac{A^2}{4} > B$, в противном случае оболочка будет тяжела и аэронат не поднимается. Из неравенства получим:

$$\delta_{OB} < \frac{K \cdot a \cdot (1 - e)^2 \cdot k_U}{20 n c_{OB}^2 \left(1 + \frac{y_3}{y_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{2}{5} \cdot \frac{y_1^2}{x_1^2}\right) \cdot \eta}.$$

Отсюда, по условиям (650), вычислим $\delta_{OB} < 1,11$.

Следовательно, наибольшая толщина оболочки, при известных условиях, для проекта е) равна 1,11 мм.

Тогда $y_1 = \frac{A}{2}$; откуда вычислим или высоту наиболее толстой оболочки: $2y_1 = 63,5$ м. При другом пределе, когда $\delta_{OB} = 0$, $y_1 = A$ и $y_1 = 0$.

Размер наиболее тонкой оболочки, значит, будет: $2y_1 = 127$ м и $2y_1 = 0$.

655. Формулы (649) дают для высоты оболочки два решения, но это не значит, что при определенных условиях, например (650), только и возможны эти два размера оболочек. Действительно, формулу (649) можем написать так:

$$y_1 = \frac{C}{n} \pm \sqrt{\frac{C^2}{n^2} - \frac{D}{n}},$$

где C и D предполагаются постоянными. Приняв определенную прочность n , получим только две величины для y_1 . Например, по (651), 57,26 и 6,26 м.

Но если n будет увеличиваться, а это (т. е. увеличение прочности) допустимо, то заметим, что член $\frac{C^2}{n^2}$ будет быстрее

уменьшаться, чем $\frac{1''}{n}$, вследствие чего пределы y_1 будут уменьшаться, сближаясь между собой. При $\frac{C^2}{n^2} = \frac{D}{n}$ оба корня y_1 сливаются.

Из последней формулы узнаем, что это случится, когда

$$n = \frac{C^2}{D}.$$

Например, для случая (651) вычислим $n = 12,6$, т. е. в 2,1 раза прочность увеличится против прежнего, когда n было равно 6, см. (650); y_1 будет равно $\frac{C}{n} = 15,12$ м.

Итак, мы можем выстроить оболочки не только в $114\frac{1}{2}$ м и $12\frac{1}{2}$ м высоты, см. (651), но и всех промежуточных размеров, что будет сопровождаться увеличением прочности n .

656. Уменьшать размеры y_1 оболочек в проектах а), б), в), г) и д) (633, 643 и 649) можно не только увеличением прочности n , но и другими средствами. Так, можно:

1) уменьшить e , или сравнительный вес оболочки, что отчасти и выгодно, так как больше подъемной силы придется на пассажиров, ладью и пр.; если мы, например, уделим на оболочку вдвое менее ($e = 0,25$ вместо 0,5), то размеры оболочки в высоту уменьшатся в 2 раза, но вес других частей корабля может увеличиться на 0,25 всей подъемной силы;

2) можно еще употребить менее прочный материал, т. е. уменьшить K ;

3) можно усилить давление y_3 газа в низшей точке оболочки, вследствие чего выиграем в устойчивости;

4) можем, при том же сопротивлении K материала, увеличить его плотность s ;

5) наконец, увеличение $(k + k_{CT} + b)$, что зависит от системы корабля, также ведет к уменьшению y_1 . Замечательно, что высота аэронаута $2y_1$ не находится в зависимости [кроме проекта е)] от a , или от разности между удельными весами воздуха и легкого внутреннего газа.

Размеры корабля, понятно, возрастают при обратном изменении упомянутых величин. Так, увеличение крепости K строительного материала вдвое влечет за собой увеличение вдвое размера аэронаута, а его подъемной силы в 8 раз.

В заключение этой главы скажем, что металлические аэронауты тем солиднее, чем размеры их больше.

При железной оболочке наименьший размер ее — не меньше $12\frac{1}{2}$ м в высоту, а при алюминиевой — не меньше 4 м.

Алюминиевая оболочка в $12\frac{1}{2}$ м высоты весьма солидна, (имеются в виду массивные ее части и сама оболочка толщиной почти в кровельное железо).

Размеры аэронатов Шварца и Дюпюи де-Лома были больше. Размер этот близок к размерам теперешних (1907 г.) французских аэронатов.

Шварц на свой аэронав употреблял алюминий толщиной в 0,2 мм, т. е. в два с лишком раза тоньше, чем я сейчас предлагаю (0,45 мм).

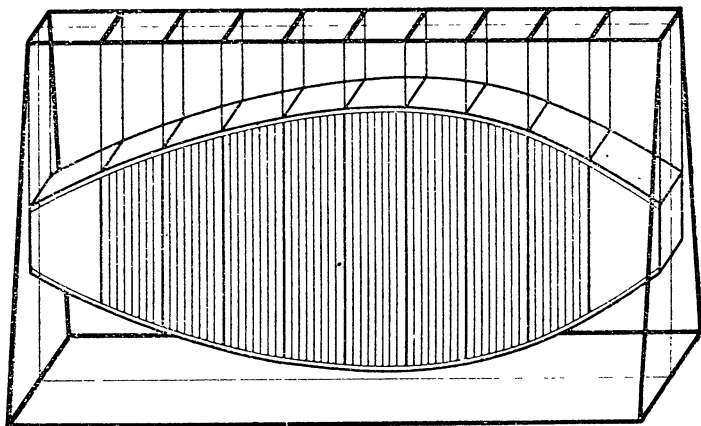
Аэронавы Цеппелина и Шварца имели внутреннюю решетчатую конструкцию, которая придавала им жесткость и поглощала огромную часть их подъемной силы.

Эта жесткость и неподатливость оболочки делают ее чрезвычайно чувствительной к малейшим толчкам, что отчасти может быть побуждало графа Цеппелина производить свои опыты над водой.

Простейший проект чисто металлического аэрона́та из волнистого металла

I. Описание чертежей

Чертежи — схематические, т. е. даже у одного и того же чертежа масштаб переменный.



Черт. 58.

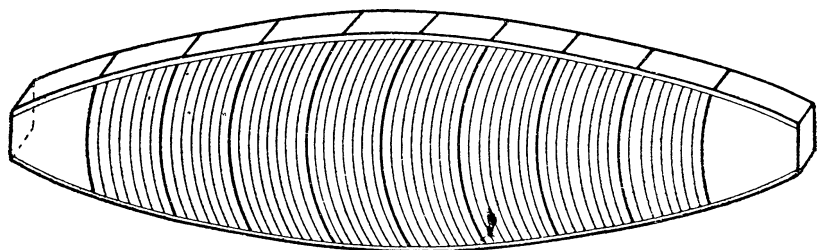
Черт. 58. Изображена металлическая оболочка аэрона́та* в плоском виде. Она не наполнена газом и висит на цепях в особой верфи. Имеет вид лодки плоскодонки, поставленной боком и закрытой палубой. Бока — из волнистого железа — снабжены вертикальными гибкими, сравнительно массивными полосами; они служат и средством соединения боковых трапеций из волнистого металла. Дно и крыша оболочки состоят из длинных и узких изогнутых поверхностей, укрепленных массивными поперечинами и продольными гибкими балками. Концы оболочки, т. е. корма и нос, оканчиваются квадратами.

* Автор называет аппараты „легче“ воздуха аэро́натами, а аппараты тяжелее воздуха — аэро́нефами.

В большом натуральном аэронате заметны издали только две волнистых, почти сливающихся, боковины; остальные же части так сравнительно малы, что их и не видно; весь аэронат имеет вид листочка ивы.

Кривые продольные линии обозначают полутрубы, прикрывающие шарнирные соединения.

Черт. 59. Та же оболочка, но в раздутом состоянии. В натуральном виде имеет форму гигантского веретена. Притупленность его заметна только вблизи.



Черт. 59.

Черт. 60. Поперечный вертикальный разрез нераздутой оболочки.

Черт. 61. То же, но раздутой оболочки.

Черт. 62. То же, но в оболочке разрезен воздух. В этом виде она наполняется газом.

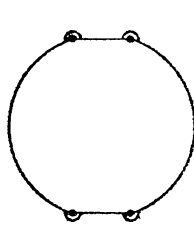
На всех этих чертежах (60, 61 и 62) черные кружочки означают шарнирное соединение двух боковин с крышкой и дном; неполные же окружности — разрез труб, прикрывающих шарнирные соединения и препятствующих утечке газов.

Для настоящих оболочек, в некотором удалении, трубы не видны.

Черт. 60 и 62 тогда принимают вид двух вертикальных полосок с почти незаметным между ними промежутком. Черт. 61 тогда — гладкий круг.



Черт. 60.



Черт. 61.



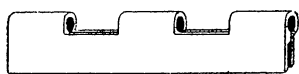
Черт. 62.

Черт. 66 изображает шарнирное соединение волнистой боковины с крышкой или дном.

Черт. 63, 64 и 65 — главные элементы металлической оболочки аэроната.

Части петель (черт. 63 и 64) выделяются фабричным путем, неограниченной длины и неизменного устройства. Толщина их соответствует размерам оболочки.

Часть, изображенная на черт. 63, смыкается с верхней или нижней узкой полосой, а часть, изображенная на черт. 64 — с волнистой боковиной; поэтому она имеет волнистый разрез, куда вставляется волнистая боковина (черт. 65), или часть ее — трапеция.

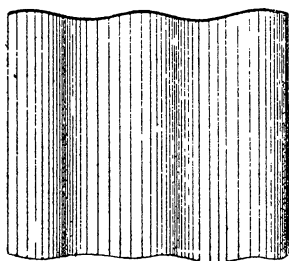


Черт. 63.

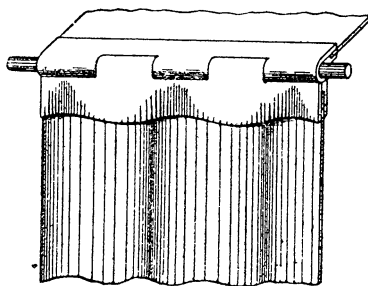


Черт. 64.

Черт. 68. Разрез шарнирного соединения, прикрытого непроницаемой для газа гибкой трубой.

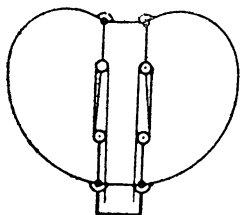


Черт. 65.

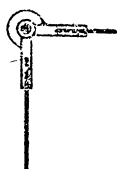


Черт. 66.

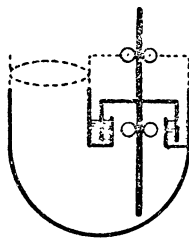
Черт. 67. Поперечный вертикальный разрез простейшего аэронаута. Внизу примыкает гондола.



Черт. 67.



Черт. 68.



Черт. 69.

Оболочка, ради устойчивой горизонтальности своей продольной оси, стянута блочной системой.

Черт. 69. Предохранительный клапан в нижней части оболочки — в гондоле. Слева, по широкой трубе, устремляется из оболочки газ.

Если давление превышает норму, то газ поднимает заслонку в виде выюшки, которая тогда своими краями выходит из кольцеобразного канала, заполненного жидкостью, и газ свободно

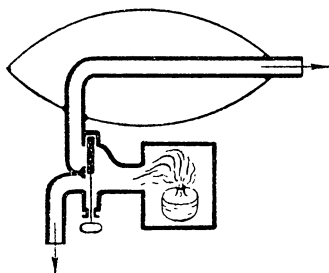
выходит, устраняя излишнее давление в оболочке. Движение заслонки облегчено роликами.

Черт. 70. Рисунок объясняет наглядно, как изменяется температура газа внутри оболочки. Это—регулятор температуры.

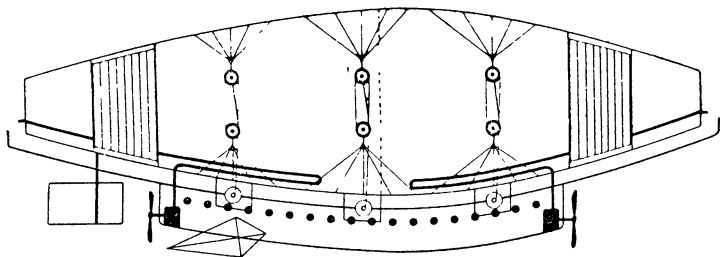
Продукты горения из моторов аэронаута устремляются в трубу, откуда часть их направляется внутрь оболочки по черной металлической трубе, нагревает легкий газ и самую оболочку и тогда уже выходит наружу. Другая же часть направляется в другую трубу и выходит непосредственно в атмосферу.

Заслонка, приводимая в движение рукой, более или менее закрывает или открывает отверстие в одну из труб, открывая или закрывая в то же время отверстие другой трубы.

Обыкновенно оба отверстия частью прикрыты, так что в оболочке устанавливается некоторая средняя температура, например в 30°C ; передвигая заслонку туда или сюда, эту температуру можно понизить до нуля (температура воздуха) или повысить до 60° .



Черт. 70.



Черт. 71.

Черт. 71. Металлический аэронавт с главными органами. Видна часть металлической волнистой поверхности. Большая часть ее устроена.

Внутри оболочки видим блочную систему ее стягивания, необходимую для устойчивости продольной оси аэронаута.

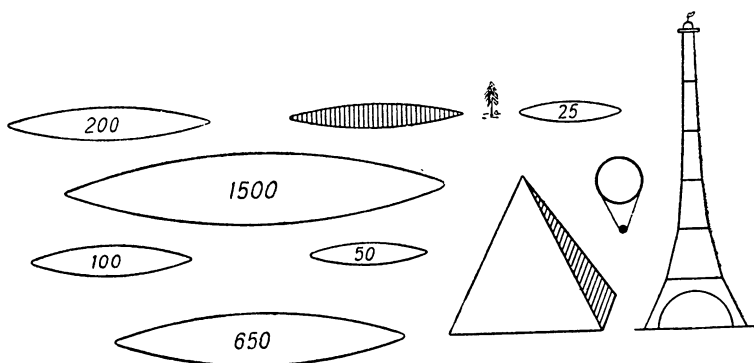
Далее, внизу оболочки, замечаем две черных трубы, куда из моторов gondoli поступают, пройдя через регулятор температуры (черт. 70), горячие продукты взрывов.

Начало труб—по концам ладьи, где размещены и моторы; там же и гребные винты. Выходные отверстия черных труб—по концам оболочки. Две трубы позволяют подъемную силу двух половин оболочки делать неодинаковой. Это—весьма могущественное средство восстанавливать горизонтальность продольной оси дирижабля. Разнице температур передней и задней частей

оболочки способствует еще легкая, но крепкая и гибкая поперечная (с ромбической сеткой) перегородка, обозначенная пунктиром. Она может быть и не прорезинена и может пропускать газ, но не очень сильно. Это—единственная сгораемая часть аэронаута; в водороде, конечно, она загореться не может; кроме того, она не очень необходима.

С левой стороны гондолы находим рули: горизонтальный (искаженный ромб) и вертикальный. Общая поверхность рулей должна быть настолько велика, чтобы заменять и стабилизаторы.

Стабилизатор мертвый, не реагирующий, как руль или птичий хвост, на изменение направления аэронаута, обременителен; он восстанавливает равновесие или надлежащее направление



Черт. 72.

аэронаута в 10 раз слабее, чем быстродействующие автоматические рули—при одной площади с мертвыми стабилизаторами. Вот почему я против употребления неподвижных стабилизаторов.

Какие же выгоды дает нам эта конструкция?

Блочное стягивание, производимое в разных местах гондолы, дает напряженность газа и устойчивость продольной оси. Стягивание в одном конце и распускание в другом наклоняют продольную ось или позволяют восстанавливать горизонтальность уже наклоненной оси. Того же достигают, но гораздо легче, с помощью двух регуляторов температуры (черт. 70).

Для того же может служить и перетягивание середины перегородки в ту или другую сторону.

Одновременно и согласно действующие регуляторы температуры дают возможность аэронауту подниматься, опускаться и изменять подъемную силу без потери газа и балласта.

При изменении объема и давления газа внутри оболочки, от поднятия ее или других причин, нарушенная норма давления восстанавливается стягиванием или распусканьем оболочки.

Если же этого не удалось сделать, то повышенное давление газа устраняется несколькими предохранительными клапанами (черт. 69), которые выпускают излишний газ. Разумеется, это только оплошность, которую не надо допускать.

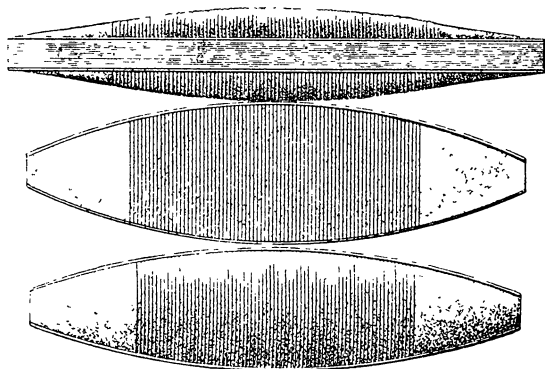
Галлерея дает возможность, даже во время полета, обследовать не только дно, но и крышу оболочки.

Черт. 72. Относительные размеры аэронавов по отношению к башне Эйфеля, пирамиде Хеопса, палубе океанского парохода (затушевано), к соснам и привязному аэростату Жиффара.

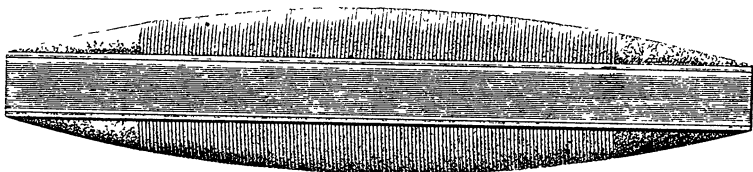
Числа показывают число пассажиров аэронава.

Черт. 73. Чисто металлические модели аэронава, устроенные исключительно из железа. Это, так сказать,—первое воплощение идей.

Посредине — плоский аэронав, снизу — слегка выпуклый, наверху — вполне раздутый. Видны полутрубы, которыми прикрывается шарнирное соединение по углам оболочки.



Черт. 73.



Черт. 74.

Черт. 74. Надутый аэронав в более ясном виде. Видна верхняя часть, такая же, как и нижняя.

Длина каждой модели составляет около 2 м.

II. Преимущества

1. Несгораемость. Нет ничего в нем воспламеняемого — ни в оболочке, ни в гондоле, кроме некоторых предметов комфорта. Газ сам по себе не дает взрывов, а только горюч. Если бы образовалось множество небольших отверстий в оболочке и случайно бы загорелся выходящий газ, то мы получили бы ряд спокойных огней (факелов), обращенных наружу, так как внутреннее давление не позволит воздуху входить внутрь оболочки; стало быть, смешения не будет и взрыва — также. Само собой, что и оболочка не загорится, не расплавится, а только

будет терять газ. Она будет спокойно сжиматься, теряя понемногу подъемную силу. На обычных аэронаутах каждую минуту пассажиры и в особенности управители (пилоты), как более компетентные, находятся под страхом пожара. Строжайше запрещено на них курить или зажигать огонь. Действительно, довольно минуты, чтобы все погребло и аэронаут обратился в пепел. Страх и ужас парализуют деятельность ума и рук. Загорается газ иногда и неожиданно от электрической искры, происходящей от трения частей или от атмосферного электричества. Предвидеть и предупредить причину такого несчастья очень трудно. Малейшая суеверность, недоразумение и управители уже теряют голову и способствуют сугубому несчастью.

2. **Непроницаемость оболочки для газов, отсутствие осмоса.** Нет опасений потерять подъемную силу. Буря, ураган, вихри, непогода, невозможность спуска на землю — нестрашны. От всего этого можно подняться в спокойный слой атмосферы, где всегда хорошая погода и безмятежно светит солнце, а ночью путь указывают звезды, месяц, компас, барометр и другие приборы.

Можно сколько угодно пробыть в этих высотах и, разумеется, спуститься в благоприятное время и в благоприятном месте совершенно безопасно. Пускай внизу бушует непогода, мы же будем благодушествовать в царстве света и чистого воздуха. Даже и моторы можем остановить.

3. **Негигроскопичность металла.** Благодаря ей аэронаута не утяжеляется в зависимости от влажности воздуха или дождя.

4. **Долгота службы аэронаута.** Алюминий, никель и многие другие металлы сохраняются столетия без изменения; также — и железная оболочка, своевременно покрываемая лаком или краской. Прочна и оболочка, хорошо оцинкованная. В больших аэронаутах оболочка может быть вдвое толще кровельного железа, а из алюминия в 6 раз толще (3 мм). Надлежаще устроенные металлические оболочки больших аэронаутов почти вечны.

5. **Дешевизна железа.** Прорезиненная ткань не только при одной поверхности в 50 раз дороже, но и, главное, скоро разрушается от солнца, погоды и огня. Ввиду ее недолговечности она, по крайней мере, в 1000 раз дороже железной. А как заманчиво удешевить аэронаутов чуть не в 1000 раз!

6. **Крепость материала** позволяет делать аэронаутов до 300 м высоты, причем они поднимают до 200 000 пассажиров каждый. Такие аэронаутов могут двигаться быстрее поездов. Перемещение на них обходится дешевле, чем на пароходе, так что (см. мое „Простое учение о воздушном корабле“) кругосветное путешествие на них становится доступным для каждого человека.

7. **Блестящая поверхность металлической оболочки** мало нагревается от солнца и меньше охлаждается от ночного лучеиспускания, или когда днем набегает облачко и прикрывает аэронаута своей тенью.

Перемена температуры внутреннего легкого газа, происходящая от этой причины, заставляет то выпускать газ, то терять

балласт. Эта потеря, вообще, больше, чем от осмоса газов. Понятно, что для металлической оболочки она минимальна.

8. Подогревание легкого газа. Собственно, терять газ и балласт металлическому аэронату совсем не приходится благодаря искусственному повышению и изменению температуры газа внутри оболочки. Опасно было бы нагревать газ, если бы оболочка была воспламеняемой. Продукты горения из моторов проводят в особую черную металлическую трубу, находящуюся внутри аэроната. Через нее охлажденные продукты и выходят наружу, в атмосферу. От этого легкий газ всегда нагрет выше температуры окружающего воздуха. Если часть продуктов горения выпускать непосредственно в воздух, то температура внутри аэроната будет меньше. Одним словом, температуру легкого газа можно изменять между известными пределами, что дает еще множество преимуществ металлической оболочке, именно:

а) Высокая температура увеличивает подъемную силу газа.

б) Она не дает намерзать и застывать воде и снегу на оболочке в случае путешествия зимой или в полярных странах.

в) Изменение температуры позволяет изменять и подъемную силу аэроната в огромных размерах. Так, например, можно снять на землю всех пассажиров или все полезные грузы и аэронат после этого не устремится бомбой в облака, — благодаря искусственному понижению температуры газа.

г) Изменение подъемной силы дает возможность аэронату подниматься и опускаться без всякой потери газа и балласта.

д) По этой же причине аэронату легко бороться с естественным колебанием температуры газа от действия солнца и других причин. Когда, например, газ нагревается солнечными лучами, температура искусственно понижается и стремление аэроната кверху парализуется.

9. Ненадобность баллонета. Чтобы наружная форма обычного дирижабля не изменялась от изменения высоты его положения и других причин, он имеет внутри мешок (баллонет), надуваемый в той или иной степени воздухом. От этого мягкая поверхность дирижабля остается гладкой, на ней не образуется грубых складок, мешающих управлению им. Но металлический аэронат не может образовывать складок, его форма всегда правильная, легко рассекающая воздух, и потому для этой цели металлический аэронат в баллонете не нуждается. Последний еще полезен для соблюдения продольной устойчивости; но у нас она сохраняется благодаря сильному натяжению волнообразной оболочки. Если бы для больших аэронатов этого натяжения оказалось недостаточно, то есть другие средства достигнуть устойчивости (черт. 67 и 71). Мы о них много писали, и они теперь в самых последних конструкциях уже применяются (Крокко и Торес-Квеведо).

10. Построенная модель показала, что вполне упругий аэронат получается уже при высоте его в 2 м². Теория же показывает, что высота его может достигать и высоты башни Эйфеля (300 м). Благодаря возможности малых размеров можно начать постройку

с маленького аэронаута. Тогда мы рискуем немногим, а между тем научимся строить аэронауты более серьезных размеров. Поэтому второй шаг мы уже сделаем почти с уверенностью в успехе.

11 и 12. Возможность грандиозных размеров оболочки допускается крепостью и дешевизной железа и стали. Большие размеры делают металлические аэронауты, как я многократно доказывал в своих трудах, самым дешевым способом перемещения людей и грузов. Сейчас *скорость* цеппелина достигает 75 км в час; для больших металлических аэронаутов она будет вдвое более, т. е. не уступит скорости аэропланов.

13. Легкое наполнение газом. Когда оболочка висит на верфи в плоском виде, из нее вытягивается воздух. Она сжимается, стенки ее сближаются до соприкосновения, только сверху и снизу остается немного воздуха. Тогда пускают сверху легкий газ и продолжают снизу вытягивать воздух, пока последний не заменится водородом. Теперь накачивают вентилятором водород, закрыв все другие отверстия (черт. 58, 59, 60, 61 и 62.)

14. Объем оболочки упруго изменяется почти от нуля до определенной величины. При этом плавность формы ее не нарушается. Если половину наибольшей вместимости аэронаута наполнить при уровне океана газом, то аэронаут, без баллонета и всяких хлопот, будет в состоянии подниматься на 5 км высоты. При этом, вследствие натянутости волнистой оболочки, устойчивость продольной оси во все время поднятия не нарушается. Также не нарушается и его способность рассекаать воздух. Таким образом металлический аэронаут перелетит почти через все горы, через все плоскогорья. Для его движения не будет препятствий.

15. К металлическому аэронауту нашего устройства *удобно пристроить* гондолу, гребные винты, рули и стабилизаторы. Для этого могут служить обе продольные массивные полосы: верхняя и нижняя. Каюты могут быть и внизу и на крыше, также и гребные винты, что чрезвычайно облегчит защиту аэронаута и управление им. Нужно только ради устойчивости, чтобы нагрузка и вес нижней ладьи были значительно больше нагрузки и веса верхних кают.

16. Нет надобности жечь дорогой и опасный бензин. Для работы моторов может быть употреблен газ, наполняющий аэронаут. Если это светильный газ, то он окажется дешевле бензина в 10 раз; если же чистый водород, то не дороже бензина. По мере истребления газа в оболочке внутренность ее должна подогреваться описанным способом. Когда же температуру газа повышать более невозможно, то нужно спуститься на землю, охладить газ и пополнить им оболочку. Тогда аэронаут опять будет готов на тысячи километров безостановочного пути.

17. Простота устройства. Необходима верфь, т. е. огромный сарай, к потолку которого можно привесить верхнюю продольную полосу. Сделав это, надо присоединить к ней боковины. Они ровны и состоят из трапеций. Каждая из них устраивается

отдельно в том же ангаре, внизу на горизонтальной или наклонной плоскости. Трапеция сделана из волнистой жести (черт. 65). Волны одинаковы для каждой трапеции и для всех вместе. Сверху и снизу непараллельные стороны трапеции имеют петли (черт. 63, 64, 66 и 68) для шарнирного соединения с такими же петлями верхней и нижней массивных полос. Параллельные же (верхняя и нижняя) стороны трапеций имеют приспособления для взаимного их герметического соединения; это соединение производят уже после их прицепления к полосе. Далее присоединяют к трапециям нижнюю массивную полосу. Наконец все шарнирные соединения герметически прикрывают цилиндрическими неполными трубами (черт. 60, 61 62, 63 и 67). Присоединение гондолы, гребных винтов и пр. делается обычным путем. Добавим, что все решительно сооружено из металла (черт. 71). Заметим, что все части сцепляются сначала геометрически, а потом уж герметически.

18. Безопасность для жизни. Цеппелиновский аэронавт можно было бы считать самым безопасным, если бы не легкая его воспламеняемость. Он был бы безопаснее моего, если бы при своей системе был вполне металлическим, что невозможно без коренного изменения его устройства.

В самом деле, если бы и вышел весь легкий газ из цеппелина, последний все-таки будет сохранять свою внешнюю форму, водород в которой заменится воздухом. Таким образом эта форма, имея значительную поверхность, не дает ей падать чересчур быстро: этот аэронавт в то же время и *немного* парашют.

Наш аэронавт не имеет этого преимущества, если не вдувать через большой запасный вентилятор в прорванную оболочку воздух.

Но воспламеняемый материал уничтожает все преимущества в современных дирижаблях.

Общая таблица для дирижаблей от 60 до 300 м длины

І. Пояснения к таблице

Общее примечание редактора. Приводимая ниже таблица представляет описание ряда геометрически подобных дирижаблей. Все они имеют максимально тяжелую оболочку, толщина которой пропорциональна линейным размерам корабля (стр. 31).

Как видно из строк 22 и 34, запас прочности оболочки, рассчитанной на порядочное сверхдавление, чрезвычайно велик. Это обстоятельство и возможность применения нержавеющей стали крепостью 120 кг/мм² позволяют весьма значительно облегчить корпуса больших кораблей. Кроме того, условная полетная высота 2900 м, принятая в таблице ($\frac{3}{4}$ объема газохранилища, стр. 8), весьма велика. Поэтому хотя таблица и грешит большим оптимизмом в отношении стоимости дирижаблей, их грузоподъемность обещает быть еще выше, чем об этом говорится в таблице (строки 10 и 50). У цельнометаллических дирижаблей все данные к тому, чтобы стать средством дешевого массового транспорта.

1. Высота раздутой оболочки в м, не считая оснований. Основания увеличивают эту высоту; но, так как дирижабль наполняется только до $\frac{3}{4}$ своего наибольшего объема, то истинная высота неподнявшегося еще аэронаута даже меньше приведенной. Наибольшая приведенная в таблице высота в 6 раз меньше высоты башни Эйфеля и в 2 раза больше высоты рослых сосен. *Заметим, что числа таблицы выражены в м и кг, где единицы не названы.*

Высота дирижаблей страшит; но, во-первых, к большим размерам подойдем постепенно, строя сначала небольшие аэронауты; во-вторых, стройка происходит на горизонтальной плоскости; это не только удобно, но аэронаут, расположенный на земле, не пугает тогда своими размерами. При наполнении водородом он подымается и держится газом, как парус перекаладиной. Он просто висит на газе. Вообще нужно помнить, что все части дирижабля висят, т. е. подвергаются растяжению, а не сдавливанию, как, например, на корабле. Это чрезвычайно увеличивает прочность, уменьшает вес и облегчает построение.

2. Наибольшая ширина строящейся плоской оболочки, не надутой еще газом; она в 1,57 раза больше первого ряда чисел. Платформа для постройки должна быть на 30% шире для расположения оснований.

3. Длина дирижабля. Платформа немного длиннее. Длина наибольшего аэронаута сравнивается с длиной океанского парохода, высота же несколько больше ширины морского гиганта. Длина дирижабля в 6 раз больше его высоты. Цеппелины уже строят таких размеров.

4. Ширина оснований оболочки. Она составляет 10% высоты оболочки и изменяется от 1 до 5 м. Выгоднее основания делать в середине шире, чем по концам. Выигрывается продольная прочность раза в полтора и прибавляется подъемная сила процента на три. В таблице основания принимаются прямоугольными, одной и той же ширины. Длина их равна длине оболочки.

5. Поверхность волнистой оболочки. Она раза в 3 больше площади продольного среднего сечения.

6. Поверхность двух оснований. Она составляет 11,5% площади боковых волнистых половин.

7. Полная поверхность газового хранилища.

8. $\frac{3}{4}$ полного объема газохранилища. Наполнение на $\frac{3}{4}$ позволяет дирижаблю подниматься без потери газа на 2 км высоты и плавать, если нужно, на этой высоте. Объем самого большого из приведенных дирижаблей в 2 раза больше проектируемого цеппелиновского гиганта. Средний металлический дирижабль по объему сравнивается с цеппелином, имеющим 50 000 м³ вместимости.

9. Подъемная сила дирижабля. Плотность воздуха принимается 0,00129, плотность газа в 0,00009, т. е. в 14 раз меньше. Это — водород. Подъемная сила 1 м³ его составит 1,2 кг. Разумеется, она меньше на высотах и при температуре выше нуля и больше в местах ниже уровня океана и в холоде ниже нуля. Также она увеличивается при увеличении атмосферного давления, и наоборот. Подъемная сила равна весу дирижабля со всем содержимым, за исключением газа.

10. Число людей на дирижабле. Оно изменяется от 5 до 610 чел. На каждого с багажом полагается 100 кг. Вес всех людей с багажом принимается в 5 раз меньше подъемной силы; т. е. он составляет 20%. Число служащих составляет не менее 9; следовательно, только аэростат в 15 м высоты может везти 8 пассажиров и потому может приносить некоторый доход. На больших дирижаблях число служащих сравнительно незаметно и потому эти дирижабли могут приносить большие выгоды.

11. Поверхность дирижабля, приходящаяся на одного человека. Она изменяется от 304 до 63 м² и выражает относительное трение или сопротивление, испытываемое оболочкой при ее движении и приходящееся на одного человека. Поверхность крыльев аэроплана, с обеих сторон не менее 30 м², да корпус имеют не менее 20 м² внешней поверхности. Значит, одно трение в аэроплане близко к трению поверхности дирижабля

в 50 м высоты. Но аэроплан имеет еще громадное сопротивление тяжей и разных выдающихся частей, чего нет почти в дирижабле. Кроме того, аэроплан массу энергии тратит на поддержание себя в воздухе, т. е. на борьбу с тяжестью, чего не надо дирижаблю. На большом дирижабле 63 м² металлической поверхности, заключающая водород, несут человека и соответствующую ему часть гондолы со всеми органами управления. Эти 63 м² составляют поверхность кубической каретки с ребром около 3 м.

Поверхность, приходящаяся на 1 чел., всегда включает 440 м³ водорода. Она-то и несет человека со всем его комфортом, багажом и двигателями; 400 кг дешевого металла и эти 440 м³ газа вечно* держат и двигают человека с его багажом. В этих 400 кг заключаются и оболочка, и гондола, и органы движения, и все необходимое.

12. Площадь наибольшего поперечного сечения оболочки, не принимая в расчет оснований и вдавленности. Истинная площадь немного меньше. Она также выражает сопротивление воздуха движению дирижабля. Но он заострен и потому истинное сопротивление, по крайней мере, в 25 раз меньше. Площадь эта в 19,4 раза меньше поверхности дирижабля и составляет 5,6% от нее. Главное продольное горизонтальное сечение меньше поверхности оболочки, не считая оснований, раза в три. Оно выражает сопротивление при вертикальных движениях оболочки.

13. Предыдущие числа, уменьшенные в 25 раз. Они выражают сопротивление дирижабля при его поступательном движении.

14. Те же площади, деленные на число людей, т. е. сопротивление, приходящееся на одного человека. Оно совсем невелико и уменьшается с увеличением размеров дирижабля. Оно для больших дирижаблей меньше того, которое испытывает человек, катающийся на коньках или вообщедвигающийся в спокойном воздухе с такой же скоростью, как дирижабль. Но так как скорость его велика, то на преодоление сопротивления атмосферы полагается 7 л. с. на каждого пассажира воздушного корабля. На первый взгляд кажется странным, что относительное сопротивление на дирижабле, при его больших размерах, меньше сопротивления человеческого тела. Но это последнее сопротивление можно на дирижабле совсем не считать, так как люди закрыты от ветра гондолой весьма малого сопротивления.

15. Мощность всех двигателей на воздушном корабле, принимаемая за единицу $\frac{3}{4}$ л. с., или 100 кг · м. Она доходит до 3 тысяч

* Оболочки из белой жести длиной 2 м, построенные автором в 1913 г., так же как и латунная оболочка, спроектированная автором и построенная под моим руководством в 1926 г., держали газ по несколько недель без следов утечки. Также и образцы из листов углеродистой или нержавеющей стали, соединенные при помощи электросварки, показали их полную газонепроницаемость. Расход газа в полете, обычный для дирижаблей других систем, заменяется у Циолковского регулированием температуры водорода.

Прим. ред.

метрических сил, или до 4 тысяч обыкновенных, между тем как аэроплан с двумя пассажирами требует 150 сил, или на одного 75 сил. Наш большой дирижабль имеет около 600 пассажиров. Значит, на каждого идет только 7 л. с., или в 10 раз меньше.

Определение мощности основано на многочисленных расчетах и опытах по сопротивлению воздуха. Она невелика, потому что корпус и гондола дирижабля имеют совершенную форму при полном отсутствии складок и других неправильностей. Высокая и узкая гондола служит прекрасным килем, а горизонтальное оперение, как увидим, оказывается почти излишним. Следовательно, сопротивление среды минимально.

16 и 17. Вес моторов. Мы даем на двигатели гораздо больше, чем дают на аэропланах, именно—чуть не в 10 раз больше. Зато от этих двигателей можно ждать исправного действия и долговечности. Этого же, впрочем, можем достигнуть и при двигателях по 5 кг на метрическую силу. Тогда приведенные числа можно уменьшить вдвое. На практике же, подражая аэропланам, можем довести вес мотора наибольшего дирижабля до 3 т (стр. ...).

На моторы мы ассигновали 10% всей подъемной силы, но при легких моторах пойдет только 5% и даже 1% подъемной силы. Конечно, последние двигатели будут так же ненадежны, как и аэропланные. Только ненадежность аэропланых двигателей грозит худшими последствиями, так как там остановка двигателей принуждает к падению или сомнительному планированию. На дирижабле порча моторов также затрудняет спуск; но, в первых, здесь спуск необязателен, во-вторых, трудно предположить, чтобы оба мотора испортились одновременно. Остановка же одного почти незаметна. Так что легкие моторы гораздо применимее к дирижаблю, чем к аэронефу.

18. Давление на дирижабль встречного воздушного потока; оно равно давлению на все вращающиеся винты и составляет только 3,3% всей подъемной силы; следовательно, оно в 30 раз меньше подъемной силы, или в 6 раз меньше веса людей, так как люди составляют пятую долю подъемной силы.

Давление на винты от их вращения и давление встречного воздушного потока на корпус аэронаута и его гондолу составляют две равные, противоположные и параллельные силы, т. е. так называемую пару сил. Эту пару сил надо, так или иначе, уравновесить, чтобы аэронавт не задира л нос кверху.

19. Секундная скорость дирижабля.

20. Часовая скорость дирижабля в км. Изменяется от 62 до 106 км. Есть возможность силу двигателей маленьких аэронаутов увеличить в 8 раз. Тогда скорость возрастет в 2 раза и будет чуть не вдвое больше, чем у аэропланов. Возможно это и для больших дирижаблей.

21—23. Давление газа или, вернее, разность давлений газов снаружи и внутри оболочки дирижабля, на 1 м²; пределы от 6 до 90 кг. Это давление показано для низшей, средней и высшей точек оболочки. На любой горизонтальной плоскости сече-

ния или на одной высоте давление одинаково. Оно вообще пропорционально высоте газа над низшей точкой оболочки плюс постоянное давление. Это постоянное давление зависит от нас, т. е. от силы стягивания оболочки. Низшее, среднее и высшее давления у нас относятся, как числа 1, 2 и 3. Но при сильнейшем стягивании может получиться иное отношение, например: 2, 3, 4 или 11, 12, 13. Для самого большого из приведенных в таблице аэронатов среднее давление равно 60 кг/м^2 . Приведенные числа выражают также давление газа в мм водяного столба.

24. Полное продольное давление газа на наибольшее поперечное сечение оболочки. Оно составляет $38,6\%$ подъемной силы и потому довольно велико. Разумеется, оно убывает быстро к концам оболочки. Оно должно уравниваться натяжением продольных оснований и волнистых боковин дирижабля (черт. 74 и 76). Последнее натяжение непостоянно, потому что зависит от степени наполнения оболочки газом и от силы ее стягивания. Поэтому продольные основания (черт. 73) также подвергаются непостоянному натяжению. При расчете прочности оболочки лучше всего сопротивлением волнистой поверхности пренебречь.

25. Продольное натяжение волнистой оболочки. На основании формулы (339) моего сочинения „Теория металлического аэростата“* вычисляем натяжение по данным таблицы и текста о волнистой поверхности. Сравнивая это натяжение с полным давлением газа на поперечное сечение, видим, что упругость волнистой поверхности составляет в больших кораблях незначительную часть давления газов: именно, для оболочки в 10 м высоты — 60% , для 20 м — 30% , для 40 м — 15% и т. д. Следовательно, на сопротивление волны нельзя рассчитывать, а только на основания. Впрочем, уменьшая размер волн и их крутизну, можем сопротивление их увеличить; только от этого уменьшится предел упругого растяжения; но оно у нас вообще избыточно и может быть еще уменьшено в два раза, так как на практике оболочке не приходится складываться в плоскость. Если размер волн уменьшить в два раза, то натяжение оболочки будет уже составлять до 120% давления газов, т. е. оно будет сильно увеличивать прочность дирижабля, особенно ближе к его концам.

26 и 27. Натяжение оснований от давления газа, пренебрегая сопротивлением оболочки. Сумма обоих натяжений тогда составит давление газа. Оба давления относятся, как числа 9 и 7. Впрочем, натяжение зависит от силы стягивания оболочки: чем оно больше, тем отношение обеих стягивающих сил ближе к единице. Натяжение в других точках оснований тем меньше, чем они ближе к концам, или чем меньше площадь сечения оболочки. Таким образом как-будто неэкономно сопротивление оснований делать на всем их протяжении одинаковым. Можно, действительно, его ослаблять к концам, но не очень, так как при случайных наклонениях дирижабля давление газа на концах возрастает.

* См. стр. 120 в этой книге.

28—30. Поперечное натяжение оболочки на 1 м ее сечения изменяется в зависимости от размеров дирижабля и высоты сечения в одной и той же оболочке. Приведены: низшее, среднее и высшее напряжения. Они относятся, как числа 7, 8 и 9.

31. Толщина оболочки и материала полутруб. Она выражена в мм. Сколько метров высоты имеет оболочка, столько сотых долей миллиметра имеет ее толщина. Оболочка—железная или стальная. Из дуралюминия—в три раза толще.

32. Толщина оснований и материала петель в три раза больше.

33. Продольная прочность оболочки уменьшается с увеличением размеров дирижабля в высоту. Но ее можно повысить в несколько раз, если увеличить ширину оснований, отчего почти на столько же увеличится подъемная сила дирижабля, так что он поднимет все, что и прежде поднимал.

34. Прочность поперечная. Она в два раза больше.

35а. Полная высота волн оболочки в см. Длина волн в 2,7 раза больше.

35б. Длина волн в см.

36. Ширина ленты, из которой выгибают петли. Она в 10 раз больше высоты волн. Толщина петель такая же, как оснований. Ленту составляют двойной по ширине и в этом виде делают пробои для петельного соединения, потом уже разрезают на две ленты. Они составляют пару, соединяемую со стержнем. Вес петель составляет 2,2% всей подъемной силы. Сопротивление их немалое. Оно составит около 20% сопротивлений оснований.

37. Ширина ленты полутруб. Она в 8 раз больше высоты волн. Вес полутруб вычислим в 0,26% всей подъемной силы.

38. Вес 1 м² боковой оболочки с прибавкой 10% на спай и волны. Толщина всякого рода оболочек в дирижабле большей частью пропорциональна линейным размерам дирижабля. Так, волнистая оболочка для наибольшего аэронавта в 300 м длины сделана из материала толщиной в кровельное железо. Волны и спай увеличивают поперечное сопротивление оболочки на 10%.

39. Ширина гондолы, или ширина ее пола. Для аэронавтов с 15 м высоты гондولا сверху расширяется, чтобы сравняться с более широким основанием оболочек. Ширина достаточна для помещения верхних коек и висячих сидений. Проход остается достаточный.

40. Высота гондолы показана наименьшая; вследствие кризиса дирижабля к носу и к корме она больше, что дает возможность поместить тут винты большего диаметра. Это позволяет увеличить полезную отдачу винтомоторной группы.

41. Число этажей. Только у наибольшего два этажа.

Большая высота удобна для помещения коек выше человеческого роста и для проведения нагревательных труб.

42. Диаметр винта.

43 и 44. Длина гондол и площадь их полов.

45. Площадь пола, приходящаяся на одного человека. Для самого малого дирижабля она непроизводительно велика, для других дирижаблей составляет около 2 м². Этого вполне довольно,

чтобы с помощью висящих над головой тросов доставить каждому пассажиру просторную постель и комфортабельное помещение внизу для кресел, столов и свободного движения.

46. Толщина проволок в мм. От каждого блока идут кверху направо и налево 10 проволок; да еще вниз 10; всего 20 проволок. В шести системах будет 120 проволок довольно солидной толщины. Тросы могут быть легче. Толстые проволоки могут разветвляться к основаниям на более тонкие и многочисленные.

47. Натяжение троса в кг. При 20 блоках в каждой стягивающей системе натяжение это еще вдвое меньше. Пределы от 20 до 2500 кг. Наматывание тросов на валы для стягивания должно производиться ближайшим двигателем. Для малых дирижаблей оно невелико; даже для дирижабля на 39 чел. оно 160 кг. При построении же больших дирижаблей может быть будут изменения.

48. Высота продольных балок в см. При надувании оболочки дирижабля все продольные части его изгибаются. Полома и деформации не будет при указанной высоте труб, продольных волн на основаниях и т. д.

На практике высота эта может быть и гораздо больше, так как значительное изгибание будет только раз при наполнении водородом, и тут допустима единственная деформация. Далее же изгибание весьма незначительно. Для первого практического дирижабля диаметр труб достигает 10 см.

49. Цена дирижабля. Большую часть массы дирижабля составляют простая железная его оболочка и гондола. Эта масса не превышает 70% подъемной силы (см. графу 9); 1 кг железа, при заводском производстве, может обходиться чуть ли не в копейку*.

70% подъемной силы для аэронавта в 300 м длины составят около 220 000 кг и 2200 руб. ценности. Остаются еще двигатели и водород, но и они при грандиозном усовершенствованном производстве не окажутся так дороги, как теперь. Значит, цены дирижаблей при развитии дела могут быть понижены в 10 раз против приведенных чисел. Хотя, с другой стороны, при первых постройках они потребуют, вероятно, расходов в 10 раз больше вычисленного, особенно маленькие дирижабли, с которых неизбежно начнут постройку.

50 и 51. Полезная работа дирижабля в год и стоимость ее. Провоз 100 кг на 1000 км принимаем за единицу. Сравните стоимость (п. 51) работы со стоимостью (п. 49) дирижабля. Вы увидите, что для дирижабля в 10 м высоты стоимость работы ничтожна, для следующего эта стоимость уже в $2\frac{1}{2}$ раза больше цены дирижабля. Далее, она в 4, в 5, в 6, в 7, в 8 раз больше этой стоимости.

* В строке 49 „Общей таблицы“ автор приравнивает цену дирижабля цене железа в изделии из расчета 2 руб. за 1 кг. Цена нержавеющей стали в настоящее время выше, но высокие качества ее позволяют понизить затрату металла на большие корабли вдвое против исчисленного здесь количества, что в то же время увеличит полезный груз против данных строки 10.

Прим. ред.

II. Таблица

1а	Высота вполне раздутой оболочки, не считая оснований	10	15	20	25	30	40	50
2	Наибольшая ширина строящейся плоской оболочки	15,7	23,55	31,4	39,25	47,1	62,8	78,5
3	Длина оболочки или дирижабля	60	90	120	150	180	240	300
4	Ширина оснований оболочки или длинных полос	1	1,5	2	2,5	3	4	5
5	Поверхность волнистой оболочки	1 400	3 150	5 600	8 750	12 600	22 400	35 000
6	Поверхность полос или двух оснований оболочки	122	274	488	762	1 098	1 952	3 050
7	Полная поверхность газохранилища	1 522	3 424	6 088	9 512	13 698	24 352	38 050
8	$\frac{3}{4}$ полного объема газохранилища	2 150	7 240	17 190	33 500	58 000	137 400	268 000
9	Подъемная сила дирижабля за вычетом веса газа	2 570	8 690	20 600	40 220	69 530	164 600	321 800
10	Число людей на дирижабле	5	17	39	76	131	312	610
11	Поверхность газохранилища, приходящаяся на одного человека	304	201	156	125	102	78	63
12	Площадь наибольшего поперечного сечения оболочки, не принимая в расчет оснований и вдавненности	78,5	176,7	314,2	490,9	706,9	1 257	1 964
13	Та же площадь, уменьшенная в 25 раз	3,14	7,08	12,56	19,64	28,28	50,4	78,4
14	Те же числа, но деленные на число людей	0,63	0,44	0,32	0,26	0,22	0,16	0,13
15	Сумма мощностей всех моторов на воздушном корабле	24	82	195	381	659	1 560	3 050
16	Вес двух моторов, полагаая на 1 метрическую силу по 10 кг	240	820	1 950	3 810	6 590	15 600	30 500
17	Вес двух моторов, полагаая на метрическую силу по 1 кг	24	82	195	381	659	1 560	3 050
18	Давление на дирижабль встречного воздушного потока, или давление на все винты	80	236	509	893	1 488	3 218	5 849
19	Секундная скорость дирижабля	17,2	19,7	21,7	23,3	25,0	27,5	29,5
20	Часовая горизонтальная скорость дирижабля в км	62	71	78	84	90	99	106
21	Давление газов внутри оболочки на 1 м ² {	Низшее . .	6	9	12	15	18	24
22		Среднее . .	12	18	24	30	36	48
23		Высшее . .	18	27	36	45	54	72
24	Полное продольное давление газа на наибольшее поперечное сечение оболочки	942	3 179	7 536	14 719	25 431	60 283	11 775
25	Полное продольное натяжение волнистой оболочки в наибольшем поперечном сечении	319	717	1 276	1 994	2 871	5 104	7 975

16	Высота раздутой оболочки		10	15	20	25	30	40	50
26	Продольное натяжение оснований в наибольшем поперечном сечении	Верхнее . .	530	1 785	4 240	8 275	14 310	42 400	66 350
27		Нижнее . .	410	1 395	3 300	6 450	11 130	26 400	51 500
28	Поперечное натяжение оболочки в наиб. поперечн. сечении на один линейный метр ее продольн. разреза	Низшее . .	53	119	211	330	475	845	1 320
29		Среднее . .	60	135	240	375	540	960	1 500
30		Высшее . .	67	151	269	420	605	1 075	1 680
31	Толщина волнистой оболочки и материала полутруб в мм . .		0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
32	Толщина продольных оснований и материала петель в мм . .		0,3	0,45	0,6	0,75	0,9	1,2	1,5
33	Наименьшая продольная прочность оболочки дирижабля . .		46	30	23	18	15	11	9
34	Наименьшая поперечная прочность оболочки дирижабля . .		99	66	50	40	33	25	20
35a	Полная высота волн оболочки в см		0,5	0,75	1	1,25	1,5	2	2,5
35b	Длина волн в см		1,35	2,025	2,7	3,375	4,05	5,4	6,75
36	Ширина ленты для выделки петель шарнирного соединения в см		5	7,5	10	12,5	15	20	25
37	Ширина ленты полутруб в см . .		4	6	8	10	12	16	20
38	Вес 1 м ² оболочки с прибавкой 10% на спай и волны в кг		0,825	1,238	1,650	2,062	2,48	3,30	4,18
39	Ширина нижнего основания гондолы или ширина ее пола . .		1	1	1	1	1,5	2	2
40	Высота гондолы (наименьшая) . .		3	3	3	4	4	5	6
41	Число этажей		1	1	1	1	1	1	2
42	Диаметр каждого винта		3	4	6	8	10	12	14
43	Длина гондол		60	90	120	150	180	240	600
44	Площадь пола гондолы		60	90	120	150	270	480	1 200
45	Площадь пола, деленная на число людей		12	5,3	3,1	1,98	2,06	1,51	1,97
46	Средняя толщина одной из 120 проволок стягивающей системы в мм		1,5	2,7	4,1	5,6	7,4	11	16
47	Среднее натяжение стягивающего троса в одной системе при 10 блоках		20	68	160	310	540	1 300	2 500
48	Наибольшая высота продольных балок, волн, полутруб, нагревательных труб и т. д. в см . .		6	9	12	15	18	24	30
49	Средняя стоимость дирижабля в золотых русских рублях . .		3 300	11 100	26 300	51 300	88 700	210 000	411 000
50	Полезная работа дирижабля в год, считая только 5000 час. в году; за единицу принимаем провоз 100 кг (п. 6) на 1000 км		0	2 840	11 310	26 880	52 200	141 540	310 050
51	Стоимость этой работы в зол. руб., принимая копейчную плату с пассажира за км . .		0	28 400	113 000	269 000	522 000	1 445 000	3 100 000

Материалы к проекту металлического дирижабля на 40 человек

Я даю тут далеко несовершенный и неполный проект дирижабля в 20 м высоты и 120 м длины на 40 чел., объемом не более: 23 600 м³.

Исполнять этот проект еще преждевременно. Надо проделать ряд предварительных работ, как указано дальше в статье „Порядок практических работ при постройке дирижабля“ (см. стр. 265). После их исполнения и проект усовершенствуется сообразно полученным результатам.

Кроме того, проект при таких размерах дирижабля и не может быть очень совершенным: чем больше будут его размеры (до высоты примерно 50—100 м), тем явится возможность лучше разработать проект.

I. Основы проекта

Этот дирижабль строится на особых принципах, не применимых к другим системам дирижаблей.

1. Вполне металлический (дешевый, крепкий материал). Нет потери газа. Долговечность.

2. Изменяемость объема без нарушения плавности формы, прочности и сохранности оболочки. Простота конструкции.

3. Строительство оболочки на горизонтальной поверхности в плоском виде.

4. Надувание водородом в таком же положении, без предварительного поднятия.

5. Отсутствие верфи и ангара для хранения.

6. Ненадобность причальной башни, так как дирижабль, не имея каркаса, упруг, как мячик. Довольно невысокой мачты.

7. Ненадобность воздушных отделений и перегородок. Их заменяет стягивающая тросовая система.

8. Подогревание внутренности оболочки продуктами горения и естественное ее охлаждение избавляют нас от балласта и потери газа.

Подъемная сила дирижабля, благодаря этому, изменяется по желанию. Успешно проводится борьба с метеорологическими влияниями. Имеем ничего не стоящее изменение высоты для

удаления от бурь, гроз, качки и достижения благоприятного ветра.

9. Простота устройства и легкость построения.

10. Все грузы висят. Все силы растягивают оболочку и другие детали дирижабля, части которого благодаря этому имеют наименьший вес.

11. Гондола, моторы, грузы и пр. — все это висит и имеет опору (благодаря устройству стягивающей тросовой системы) в огромной верхней поверхности оболочки.

12. Жесткая часть дирижабля — пол гондолы — служит главной основой для укрепления органов дирижабля.

13. Предел упругости материала нигде не должен нарушаться.

14. В целом дирижабль гибок, но части его тем жестче, чем меньше.

15. Прочее устройство приблизительно такое же, как и у обычных дирижаблей. Это касается двигателей, воздушного винта и рулей.

Большинство расчетов приблизительно, но направлено в сторону невыгодную. Например, силы и веса приборов даны больше истинных, а подъемная сила меньше.

II. Некоторые теоретические замечания

Предполагается некоторое знакомство с моими работами о металлическом дирижабле. Поэтому тут не может быть больших подробностей. Многое будет подразумеваться. Здесь цель практическая: указать на его лучшее устройство и способ его построения. Формулы даю также самые простые и практические, не входя в подробные их исследования.

Форма продольного сечения оболочки дирижабля

16. Из сочинения моего „Теория металлического аэростата“ (буду ссылаться только на формулы этого труда) видно, что главное продольное сечение оболочки, вмещающей водород, выражается уравнением (259):

$$y = y_1 \cdot \left(1 - \frac{x^2}{x_1^2}\right)^{3/4}.$$

Это — очень плавная линия, как видно из чертежей. Соответствующая поверхность вращения не так полна (тупа или выпукла), как эллипсоид, но острее поверхности, образованной вращением параболической кривой (взятой у ее вершины).

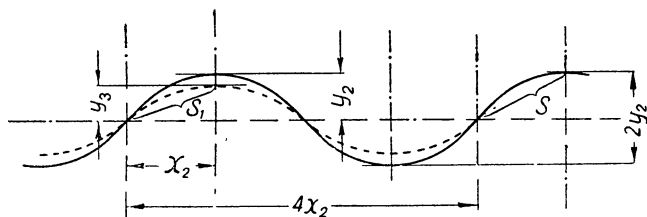
17. Плоский мешок такой формы, при раздувании, требует (в средней части) постоянной крутизны волн, что упрощает построение дирижабля из гофрированного металла. Только концы мешка требуют волн более крутых.

Чтобы избежать этого, концы поверхности меняем на конические.

Все же мы покрываем их волнами, только более мелкими, потому что гладкие поверхности (даже конические), при раздувании, образуют неправильные складки. А это грозит порчей оболочки.

Роль оснований оболочки

18. Основания необходимы, так как в больших дирижаблях они, главным образом, выносят давление газа. Но так как основания не могут быть очень широки, то они делаются в три раза толще и из самого прочного материала. Помимо этого, благодаря основаниям, изгибание частей боковин оболочки будет тем меньше, чем ближе эти части к концам, что как раз и требуется, так как высота волн почти постоянна, а радиусы кривизны боковин оболочки уменьшаются к концам.



Черт. 75.

19. Заметим, что даже такие толстые основания, расширяя объем оболочки, настолько же увеличивают ее подъемную силу, насколько увеличивается вес оболочки от прибавки оснований.

Поэтому основания не следует делать уже к концам ради экономии веса, а скорее делать их к концам тоньше или к середине толще. Можно также уширить его середину, не утолщая. Это увеличит не только сопротивление разрыву, но и подъемную силу дирижабля и потому выгоднее утолщения.

Крутизна волн оболочки

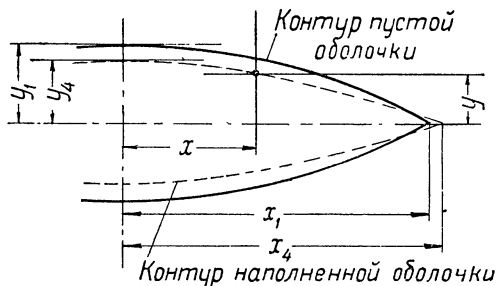
20. Грубое представление о величине растяжения волн гофра дает формула (294). Приняв обозначения, изображенные на черт. 75, найдем:

$$\frac{S - X_2}{X_2} = 0,5 \cdot \frac{Y_2^2}{X_2^2}.$$

21. Отношение $\left(\frac{Y_2}{X_2}\right)$ есть крутизна волны, $\frac{S - X_2}{X_2}$ есть отношение полного растяжения к нерастяннутому гофру. Полная

высота волны будет $(2Y_1)$, а полная длина $(4X_2)$. Отношение будет $0,5 \left(\frac{Y_2}{X_2} \right)$, т. е. это отношение вдвое меньше крутизны волны.

22. Кривая горфа или волны может быть дугой круга, укороченной синусоидой, даже — прямой. Мы рекомендуем плавную кривую, например дугу круга. Истинное растяжение, конечно, зависит и от формы сечения волны, но очень мало: ошибка будет небольшой и можно принять нашу формулу для всех кри-



Черт. 76.

вых, лишь бы крутизна $\frac{X_2}{Y_2}$

не была больше 0,5.

23. Полного выпрямления волн делать нельзя. После надувания оболочки и некоторого растяжения гофра должны еще остаться низкие или пологие волны. Если этого не будет, то потеряется жесткость гофра и может произойти его разрыв. В противном случае

разрыв невозможен (ибо мешают продольные основания).

24. На этот случай, принимая обозначение, изображенное на черт. 75, из формулы, полученной выше, см. (20), найдем:

$$\frac{S - S_1}{X_2} = 0,5 \left(\frac{Y_2}{X_2} \right)^2 \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{Y_3}{Y_2} \right)^2 \right\}.$$

Тут $\frac{Y_3}{Y_2}$ есть остаточная крутизна волн после растяжения

гофра; $\frac{S - S_1}{X_2}$ есть наибольшее, но неполное относительное растяжение гофра. При полном же распрямлении волн мы имели бы предельную вытяжку гофра.

25. Теперь перейдем к раздуванию оболочки дирижабля, т. е. переходу ее из плоского вида в поверхность вращения.

При обозначении размеров дирижабля, показанном на черт. 76, имеем (259):

$$\frac{A_1}{dx} = \frac{3\pi^2}{32} \cdot \left(\frac{y_1}{x_1} \right)^2 \cdot \frac{\left(2 - \frac{x^2}{x_1^2} \right)}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{x_1^2}}}.$$

A_1 есть приращение дуги горизонтального меридиана на протяжении dx при переходе оболочки из плоского вида в надутый или обратно. В последнем случае приращение будет отрицательным.

Это — при форме сечения, указанной в п. 17.

26. Мы доказывали, что для разных частей средней линии оболочки (кроме концов), т. е. для разных $\frac{x}{x_1}$, растяжение почти одинаково. Поэтому, чтобы найти его, положим в последней формуле $\frac{x}{x_1} = 0$. Тогда вычислим: $\frac{A_1}{dx} = 1,85 \cdot \left(\frac{y_1}{x_1}\right)^2$.

Тут $\frac{x_1}{y_1}$ есть продолговатость вполне раздутой оболочки.

27. Растяжение это (25) должно равняться растяжению гофра, см. (24), т. е. из (26) и (24) получим:

$$1,85 \cdot \left(\frac{y_1}{x_1}\right)^2 = 0,5 \cdot \left(\frac{Y_2}{X_2}\right)^2 \cdot \left\{1 - \left(\frac{Y_3}{Y_2}\right)^2\right\}.$$

Напомним, что тут $\frac{y_1}{x_1}$ есть продолговатость надутой оболочки, $\frac{Y_2}{X_2}$ — крутизна нерастянутого гофра, а $\frac{Y_3}{Y_2}$ — степень оставшейся крутизны волн после раздутия дирижабля.

28. Из (27) получим:

$$\frac{X_2}{Y_2} = 0,52 \cdot \left(\frac{x_1}{y_1}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{Y_3}{Y_2}\right)^2}.$$

Эта формула определяет крутизну волн нерастянутого гофра в зависимости от продолговатости оболочки и оставшейся крутизны волн надутой оболочки.

Мы строим нашу оболочку в плоском виде. Дается ее определенная продолговатость. Какова же наибольшая крутизна гофра? Пренебрегая основаниями, имеем:

29. $2\pi \cdot y_1 = 4 \cdot y_4$, где y_1 — радиус надутой оболочки, а y_4 — плоской. Исключая с помощью этой формулы y_1 из формулы (28), найдем:

$$30. \frac{X_2}{Y_2} = 0,817 \cdot \left(\frac{x_1}{y_4}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{Y_3}{Y_2}\right)^2}.$$

31. Положим, например: продолговатость плоских боковин оболочки равна 4, выпуклость растянутого остаточного гофра равна 0,5, т. е.

$$\frac{x_1}{y_4} = 4 \text{ и } \frac{Y_3}{Y_2} = 0,5.$$

Тогда

$$\frac{x_2}{y_2} = 2,827.$$

Вообще составим такую таблицу для разных продолговатостей плоской оболочки, определяющую крутизну волн гофра, при остаточной крутизне в 0,5 и 0,3.

Таблица 1

1	Продолговатость плоской оболочки	$\frac{x_1}{y_4}$	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
2	Продолговатость надутой, см. (29)	$\frac{x_1}{y_1}$	4,7	5,5	6,3	7,1	7,9	8,6	9,4
3	Крутизна волн при заданном остатке в 0,5 (для ненаполненной оболочки)	$\frac{Y_2}{X_2}$	0,48	0,40	0,36	0,31	0,28	0,26	0,24
4	Обратная крутизна волн при заданном остатке в 0,5 (для ненаполненной оболочки) . .	$\frac{X_2}{Y_2}$	2,1	2,5	2,8	3,2	3,6	3,9	4,2
5	То же при заданном остатке в 0,3 . .	$\frac{X_2}{Y_2}$	2,34	2,73	3,12	3,51	3,90	4,28	4,67
6	Вытяжка гофра при наполнении оболочки в % . . .	$\frac{100 A_1}{dx}$	8,4	6,1	4,7	3,7	3,0	2,5	2,1
7	Предельная вытяжка гофра при заданном остатке крутизны в 0,5 .	—	11,4	8,1	6,4	4,9	3,9	3,3	2,8
8	То же, при заданном остатке в 0,3 . .	—	9,4	6,9	5,2	4,1	3,3	2,7	2,3

В последних двух строках таблицы видим также и относительную величину полного растяжения (выпрямления) гофра, или степень сокращения гладкой металлической поверхности при ее гофрировании. Это сокращение достигает 11%, что неэкономно. Но не придется делать дирижабли, продолговатость которых в плоском виде меньше 4 (а в надutom — 6,3). В таком случае это растяжение не больше 6,4%. При гофрировке жести, по ее сокращению, можно будет судить о достаточной крутизне волн.

Согласно формулам (245) растяжение оболочки близ оснований гораздо меньше и доходит до нуля. Но уничтожение гофрировки даже у самых оснований дирижабля недопустимо, так как лишает боковины необходимой жесткости. Гофрировку можно только ослаблять по мере приближения к основаниям. Притом, ввиду вогнутости верхней части оболочки, растяжение верхних ее частей несколько больше, чем нижних. И потому еще полезно почти не уменьшать высоту волн верхней части оболочки.

Из (245) можно вывести, что сокращение A в зависимости от расстояния y от краев оболочки выражается формулой:

$$32. \quad A = A_1 \left(\frac{\bar{y}}{y_1} \right) \cdot \left(2 - \frac{\bar{y}}{y_1} \right),$$

где y_1 есть расстояние от центра до края плоской оболочки по ее поперечному диаметру.

По этой формуле можем составить примерную таблицу отношений $\frac{A}{A_1}$ для разных относительных расстояний до краев оболочки.

Таблица 2

$\frac{y}{y_1}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\frac{A}{A_1}$	0,19	0,36	0,51	0,64	0,75	0,84	0,91	0,96	0,99	1

Эта таблица будет иметь больше значения для громадных дирижаблей, где исполнение их будет точнее.

33. Экономнее оболочка более продолговатая. Так, из табл. 1 видно, что для плоской оболочки с продолговатостью в 5 (у надутой — почти 8) наибольшее сокращение меньше 4%. (Истинный перерасход меньше, так как оболочка растягивается.)

34. Упругое растяжение гофра определяется 6-й строкой табл. 1. Например, для плоских оболочек продолговатостью в 4 и 5 упругое растяжение в процентах должно быть 4, 7 и 3. Для оболочек, начиная с 2 м высоты, при плоской продолговатости в 5, это вполне достижимо, как показывают не только мои многочисленные расчеты, но и опыт постройки модели.

Также достижимо, и на том же основании, поперечное упругое изгибание оболочки, происходящее при ее надувании (см. „Теория металлического аэростата“).

Практический вывод из рассмотрения вопроса о крутизне волн оболочки изображен на черт. 75.

III. Пояснения к сводной таблице

35—40. Данные таблицы относятся к половине оболочки. Цель таблицы — выяснить силы, действующие на оболочку. По этим данным получим и указания для лучшего устройства дирижабля. Таблица необходима и для его построения.

Указываю на наиболее важные строки.

Стр. 8. Необходима при постройке.

Стр. 12. Размеры надутой оболочки в высоту.

Стр. 15. Объемы отсеков и полный объем.

Стр. 16. Подъемная сила каждого отсека и всего дирижабля (не считая вес водорода).

Стр. 17 и 18. То же при наполнении в 75%.

Стр. 34 и 35. Свободная, подъемная сила отсеков и всего дирижабля (при 100 и 75% наполнения), которая может быть

* Данные по проекту металлического дирижабля на сорок человек.

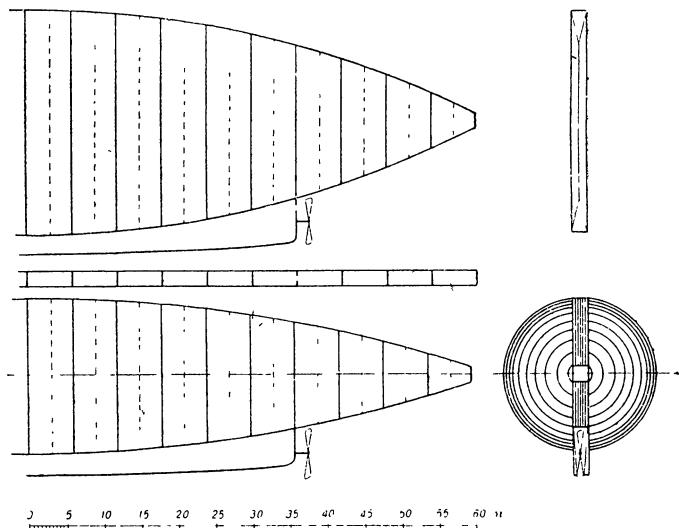
употреблена на моторы, рули, горючее, на людей и другие необходимые грузы.

Стр. 36 и 37. То же, но не на весь отсек, т. е. не на 6 м, а на 1 м его длины (или длины гондолы).

Стр. 38. Сверхдавление газа внутри оболочки на 1 м².

Стр. 66 и 67. Этими числами надо руководствоваться при определении толщины, ширины и прочности оснований в разных сечениях.

41. Черт. 77 назначен для уяснения составления сводной таблицы.



Черт. 77.

Верхняя часть черт. 77 относится к плоскому дирижаблю, нижняя — к надутому до отказа. Верхний чертеж изображает дирижабль в отвесном положении (хотя строится он в горизонтальном положении).

Поперечные сплошные линии означают нормальные к продольной оси плоскости, которые отделяют воображаемые части оболочки, или отсеки равной ширины. Их — десять. Каждый в 6 м ширины. На чертежах не обозначено относительное расстояние параллельных сечений до центра. Тут же между пунктирными линиями видим воображаемые трапеции. Сплошные отвесные линии служат им осями. При раздувании оболочки трапеции обращаются в конические поверхности.

Через x_1 обозначая длину продольной полуоси оболочки, x означает расстояние поперечной плоскости до среднего сечения. Далее следует описание таблиц по порядку строк.

42. Стр. 1. Даю отношение $\frac{x}{x_1}$, определяющее положение плоскости сечения.

Стр. 2—4. Даны величины, полезные для вычислений:

$$1 - \left(\frac{x}{x_1}\right)^2; \sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_1}\right)^2}; \sqrt[4]{1 - \left(\frac{x}{x_1}\right)^2}.$$

Стр. 5. Относительная величина ординат сложенных в плоскость боковин оболочки, или:

$$\frac{y}{y_1} = \left\{ 1 - \left(\frac{x}{x_1}\right)^2 \right\}^{3/4}.$$

Стр. 1—5 суть только отношения.

Стр. 6. Тангенсы углов плоской оболочки.

Стр. 7. Истинные расстояния сечений до среднего сечения.

Стр. 8. Ординаты y плоской боковины, принимая наибольшую среднюю ординату y_1 в 15 м. Это и дальнейшее вычисляются по формуле 5-й строки только до 10-го столбца (т. е. до сечения 0,9). Действительно, конструкция оболочки требует конических концов. Для получения их надо вообразить касательные к концам оболочки, когда $\frac{x}{x_1} = 0,9$ (строка 6).

Стр. 9. Удвоенные ординаты ($2y$) плоской (строящейся) оболочки, или диаметры поперечных сечений.

Стр. 10. То же, с приложением ширины основания, которую мы принимаем в 2 м (около 10% высоты раздутой оболочки).

Стр. 11. Ординаты вполне надутой оболочки, или радиусы сечений. Полупериметр сечения плоской оболочки мы делим на π .

Стр. 12. Диаметры поперечных сечений надутой оболочки. Ординаты и диаметры уже отклоняются от значений стр. 9 плоской оболочки—благодаря основаниям. Но немного.

Стр. 13. Площади поперечных сечений вполне надутой оболочки.

Заметим, что стр. 8—13 не зависят от длины оболочки по ее продольной оси. Они относятся ко *всякой* продолговатости дирижабля (при ширине плоской строящейся оболочки в 30 м).

Стр. 14. Вообразим, что боковины плоской оболочки состоят из трапеций, средняя линия которых совпадает с нашими поперечными сечениями. Числа строки покажут величину высот этих трапеций при длине плоской оболочки в 120 м (полуось равна 60 м), или при плоской продолговатости в 4. Первое и последнее числа относятся к полутрапециям. Поэтому и высоты их половинные.

Когда оболочка раздувается, трапеции с основаниями оболочки образуют приблизительно ряд усеченных конусов, высоты которых будут близки к высотам трапеций. Получим 11 новых конических отсеков. Только конечные отсеки будут половинные.

Стр. 15. Тут числа означают объемы этих отсеков при вполне надутой оболочке. Мы видели, что концы оболочки должны быть

коническими. Сообразно этому составляется последний столбец. Заметим, что более точные формулы дают большие объемы конусов и всего дирижабля. Объем всех 11 конусов будет 11 795 м³, а удвоенный 23 590 м. Это — объем сравнительно небольшой. Теперь строят дирижабли объема в 4—6 раз большего (даже еще больше).

Стр. 16. Подъемная сила каждого вполне надутого водородом отсека. Подъемная сила 1 м³ принимается в 1,2 кг. Подъемная сила всех 11 отсеков составляет 14 149 кг, а подъемная сила обеих половин оболочки 28 298 кг, т. е. более 28 т.

Стр. 17. Наш дирижабль наполняется, вообще, не до отказа, на 100%, а примерно на 75%. Это дает ему возможность подниматься почти на 2 км, что часто бывает полезно, а иногда необходимо.

Числа строки относятся к объему отсеков при таком (75%) наполнении. Объем половины оболочки тогда составит 8944 кг, а всей 17 888 кг.

Стр. 18. При таком же наполнении и подъемная сила каждого отсека уменьшается. Она и показана в строке. Подъемная сила всех 11 отсеков будет 10 612, а всего дирижабля — 21 224 кг.

Стр. 19. Удвоенная площадь боковых трапеций плоской оболочки. К концу прибавляется еще площадь конечного прямоугольника (2,46 · 2) м². Вся площадь равна 2604 м², удвоенная — 5208 м² (черт. 77).

Стр. 20. Вес каждой пары боковых трапеций. Плотность металла принимаем в 7,8, толщину — в 0,15 мм, 10% ассигнуем на сварку, волны и пр. При таких условиях вес 1 см² жести можем принять в 1,3 кг. Вес всего — в 3398 кг, удвоенный — 6796 кг.

Стр. 21. Вес оснований каждой пары трапеций. Принимаем плотность равной 7,8; толщину — 0,45 мм; вес 1 м² — 3,51 кг. Прибавляя 20% на шарнирное соединение, продольные (очень пологие) волны, наклон и пр., вычислим вес 1 м² основания почти в 4,2 кг. Заметим, что наклон оснований, даже на конце, увеличивает их длину только на 13%, между тем как тут основания могут быть, по крайней мере, вдвое тоньше.

Площадь оснований каждого отсека, при ширине в 2 м, вычислим по стр. 14. Умножив ее на вес 1 м² — 4,2 кг, получим и числа 21-й строки. Вес оснований одной половины оболочки будет 1000 кг, всей — 2000 кг.

Стр. 22. Вес каждого конического отсека с основаниями и шарнирными соединениями. Вес половины оболочки 4386 кг, а всей — 8772 кг.

Стр. 23. Избыток подъемной силы каждого отсека при 100% наполнения (стр. 14). Весь избыток равен 10 857 кг, а для всей оболочки — 19 714 кг.

Стр. 24. То же, при 75% (стр. 16). Избыток равен 6211 кг, а целой оболочки — 12 422 кг.

Стр. 25. Разность подъемной силы каждого отсека при наполнении на 100 и на 75%, т. е. четвертая доля полной подъемной силы или третья доля неполной. Полный избыток проще и

вернее получим, разделив всю подъемную силу (стр. 16) на 4. Найдем 3532 кг и 7064 кг для всей оболочки.

Чтобы узнать полезную подъемную силу каждого отсека, надо еще вычесть вес гондолы, стягивающей системы, над ней расположенной, нагревающей трубы и пр. Этим сейчас займемся.

Стр. 26. Определим вес стягивающей системы: полный и приходящийся на 1 *ног. м* гондолы.

Натяжение стягивающей системы не более наибольшей подъемной силы, т. е. 28 *т** (стр. 16). Сечение стального стержня, выдерживающего это натяжение, будет не более 28 *см²*, если положить: коэффициент крепости 60 *кг/мм²*; запас прочности 6; плотность 7,8. Вес 1 *м* этого стержня — 22 кг. Длину его в среднем можно положить не более 20 *м*. Значит, вес всей стягивающей системы будет не более 440 кг. Удваивая это число ввиду наличия блоков и других ее принадлежностей, получим 880 кг. На 1 *м* гондолы (длина ее равна 72 *м*) придется около 12 кг.

Стр. 27. Наметим теперь полный вес всего нагревающего аппарата, приходящегося на 1 *м*, предполагаая длину трубы во всю гондолу. Примем: полукруглое сечение диаметром 0,5 *м* и толщиной стенок в 0,13 *мм*. Поверхность всей трубы будет 57 *м²*. Вес — 57 кг. Удваиваем и округляем этот вес ввиду наличия регулятора температуры и других принадлежностей. Получим 120 кг. На 1 *м* придется 1,7 кг.

Стр. 28. Узнаем вес гондольных тяжей. Натяжение их не может быть более всей наибольшей подъемной силы (стр. 14). Поэтому вся площадь их поперечного сечения — не более 28 *см²* (стр. 26), а вес 1 *м* — не более 22 кг. Приняв же среднюю высоту гондолы в 4 *м*, получим 88 кг. Но ввиду необходимости поперечной сетки и разных мелочей мы удваиваем и округляем этот вес. Тогда получим 180 кг. На 1 *м* придется 2,5 кг.

Стр. 29. Займемся покрытием гондолы. Поверхность ее с боков будет 57 *м²*. Приняв сталь или другой материал, 1 *м²* которой весит 1 кг, и округляя, получим для боковых стенок гондолы 600 кг. В это число входит и вес легких окон и дверей. На 1 *м* гондолы придется 9 кг.

Стр. 30. Найдем полный и относительный вес пола гондолы. Примем ширину гондолы в 2 *м*, толщину, в среднем, 4 *см*, материал — дерево, плотности 0,6. Тогда вес 1 *ног. м* пола гондолы будет 45 кг. Вес всего пола — 3240 кг. Как распределен будет этот вес и другие подобные, видно будет из подробных чертежей.

Стр. 31. Вес висячих сидений, таких же коек и пр. Можем его принять на человека в 10 кг. На все 40 человек понадобится 400 кг. На 1 *ног. м* гондолы придется менее 6 кг.

* Не исключена возможность, что потребуется еще втрое большее натяжение стягивающей системы с целью увеличить натяжение оснований. Но при разрушающем напряжении современных тросов в 120 *кг/мм²* и небольшом уменьшении запаса прочности, повидному, удастся уложиться в заданный автором вес стягивающей системы.

Стр. 32. Итак, 1 *ног. м* гондолы, с сиденьями, стягивающей системой и нагревающей трубой будет весить: $12 + 2 + 9 + 45 + 6 = 75$ кг. Вес общей, на протяжении 72 м, будет 5472 кг.

Стр. 33. Дает вес отсеков гондолы.

Стр. 34. Из стр. 33 и 23 найдем подъемную силу каждого отсека гондолы и каждого сечения, свободного от гондолы, при 100% наполнения газом.

Стр. 35. То же, но при 70% наполнения (стр. 24). Последний, укороченный вдвое, отсек гондолы опирается на удвоенный (6 м) отсек оболочки и потому его свободная подъемная сила сравнительно больше.

Стр. 36. То же, но не на весь отсек, а на 1 м его длины.

Стр. 37. То же, но при 75% наполнения.

Стр. 38. Если бы гондола была во всю длину оболочки и груз на ней распределялся согласно подъемной силе каждого отсека, то не было бы сил, сгибающих дирижабль, т. е. не было бы моментов тяжести и подъемной силы. Точнее говоря, они бы уравновесили друг друга.

В таком случае оболочка подвергалась бы только вертикальному натяжению от ее веса и давления газов. В 38-й строке дано полное давление газов (разность) на каждое поперечное сечение. Тут теоретически предполагается, что к низшей точке оболочки приделана открытая снизу труба (апендикс), наполненная водородом, длиной в половину высоты оболочки (10 м). Она увеличивает среднее давление газов вдвое. Кстати заметим, что среднее давление на 1 м составляет 24 кг, высшее — 36, а низшее — 12 кг. Без прибавочного давления (т. е. без воображаемой трубы) низшее давление равно 0, среднее 12, а высшее 24 кг. Вообще оно равно:

$$p = (\gamma_B - \gamma_T) \cdot (b + h),$$

где разность между плотностью воздуха и водорода (газа) умножается на сумму высот прибавочной (воображаемой) трубы, и высоты данной площади над низшей точкой оболочки.

Стр. 39. Относительная величина ординат вполне надутой оболочки.

Стр. 40. Формула (468) дает нам отношение между двумя составляющими этого (газового) давления, натягивающими основания. Сопротивлением или натяжением боковин пренебрегаем.

Стр. 41 и 42. Дают эти составляющие силы, т. е. натяжение верхнего основания и нижнего.

Для больших дирижаблей, например на 100—1000 человек, гондола будет во всю длину оболочки и моменты свободной подъемной силы и силы тяжести будут уравновешены. Будем иметь дело, главным образом, с давлением газов. Тогда, как видно из последних строк таблицы, натяжение верхнего основания в средней его части будет почти в 1,3 раза больше, чем нижнего. Далее, к концам оболочки, оба натяжения все более и более уравниваются. Особенно опасен разрыв верхнего основания. По-

этому у гигантских дирижаблей оно в верхней средней части должно делаться толще и шире. Последнее экономнее, так как увеличивает объем и подъемную силу оболочки.

Но вообще, особенно для малых дирижаблей, довольно трудно уравновесить гондольную нагрузку со свободной подъемной силой каждого отсека. Действительно, концы оболочки, не имея гондолы и нагрузки, рожают момент подъемной силы, сжимающий верхнее основание и растягивающий нижний. Так же значительная тяжесть мотора производит момент тяжести, имеющий обратное влияние на основания. Перевозимые иногда дирижаблем тяжелые вещи имеют такое же вредное влияние на основания. Из этого видно, что необходимо считаться с моментами тяжести и подъемной силы неуравновешенного по всем отсекам дирижабля.

Положим, например, что в начале пути дирижабль полон водородом или что избыток подъемной силы равен четверти наибольшей. Избыток этот использован каким-нибудь грузом, расположенным в середине дирижабля. Посмотрим, что из этого выйдет. Для этого мы должны определить сначала отдельные моменты подъемной силы каждого отсека, потом общий момент и, наконец, действие его на оболочку. Стр. 25 дает нам избыток подъемной силы каждого отсека.

Стр. 43. Приводим расстояния отсеков до среднего поперечного сечения оболочки.

Стр. 44. Умножив избыточную подъемную силу (стр. 25) каждого отсека на расстояние (стр. 43), узнаем частные моменты относительно среднего сечения. Их и дает стр. 44. Сумма моментов относительно среднего сечения будет 74 182 кг · м.

Стр. 45. Так же можем узнать моменты подъемной силы относительно второго и прочих сечений и сумму этих моментов относительно каждого сечения. Но это же можно узнать и проще. Относительно 2-го сечения — каждый момент уменьшается на сумму всех оставшихся подъемных сил, умноженную на расстояние его до среднего сечения (3 м).

Стр. 46. Так можем узнать сумму моментов относительно каждого сечения. Для этого прежде всего к каждому числу стр. 25 прибавим сумму всех последующих чисел. Получим 46-ю строку.

Стр. 47. Теперь найдем произведение этих чисел на расстояния (стр. 43).

Стр. 48. Наконец, вычтя числа стр. 47 из соответствующих чисел стр. 45, получим общие моменты относительно каждого сечения. В первой клетке даю два момента: один относительно среднего сечения, а другой — ближайшего к нему, на расстоянии всего 3 м. („Теория металлического аэростата“ — формулы моментов: 394, 395, 396. Затем формулы: 397—399 и 442, 449 и 450).

Стр. 49—52. Какие же моменты натяжения оснований могут уравновесить эти моменты подъемной силы относительно каждого сечения? Мы можем определить неизвестные прибавочные (равные и противоположные) натяжения оснований каждого сече-

ния из уравнения: $z \cdot y + z \cdot y = M$, или $z = \frac{M}{2y}$, где z — неизвестное прибавочное натяжение основания, y — радиус сечения надутый оболочки, который известен из 11-й строки, M есть сумма моментов подъемной силы сечений, известная из 45-й строки. По этим данным (стр. 49 и 44) вычислим прибавочные натяжения оснований (стр. 50). Сравнивая эти числа (стр. 50) с напряжением оснований от давления газов (стр. 41 и 42), видим, что натяжение нижнего основания должно сильно увеличиться, а верхнего сделаться обратным, т. е. оно будет подвергаться сжатию (стр. 51 и 52).

Так будет обстоять дело, если груз будет сосредоточен в середине дирижабля. Тогда будет бесполезно пропадать сопротивление верхнего основания, между тем как нижнее придется делать вдвое толще. Все это невыгодно. Главное — это неэкономно в отношении соблюдения наименьшего веса, что в летательных приборах должно стоять на первом месте.

Теперь допустим, что избыточный груз в 7064 кг (стр. 25) расположен на концах оболочки. На каждом конце окажется по 3532 кг.

Избыточная подъемная сила сечения будет стремиться концы оболочки поднимать; конечные же грузы эти концы будут стремиться опускать. Насколько оба момента могут друг друга уравновесить, увидим из вычислений.

Стр. 53. Даем расстояния конца оболочки (или груза) до каждого сечения.

Стр. 54. В этой строке мы вычисляем моменты тяжести этого половинного груза (3532 кг) для каждого сечения, т. е. множим 3532 кг на расстояние груза до сечения. Пользуемся стр. 53.

Стр. 55. Определяем избыточное натяжение z оснований из уравнения: $2z \cdot y = M$, или $z = \frac{M}{2y}$. С помощью стр. 54 и 49 узнаем z .

Сравнивая полученные числа с натяжением (стр. 50) от избыточной подъемной силы, видим, что последнее далеко не заглаживается конечными грузами: вопиющая неравномерность остается.

Отсюда видно, что необходимо возможно равномернее распределить грузы в гондоле, в соответствии с величиной подъемной силы каждого отдельного отсека. При этом все же натяжение верхнего основания (ближе к среднему поперечному сечению) будет несколько больше, чем нижнего, что не только неэкономно, но и опасно в больших дирижаблях, где запас прочности невелик. Разрыв же верхнего основания опаснее, чем разрыв нижнего.

Стр. 56. Результат совместного действия тяжестей на концах (стр. 55) и подъемной силы (стр. 50) выражается положительным изменением натяжения оснований оболочки, приведенным в этой строке.

Стр. 57 и 58. Сравнивая с натяжением от давления газов (стр. 51), видим, что натяжение верхнего основания сильно увеличится, а нижнего еще сильнее уменьшится и даже для средних частей основания и концов его делается отрицательным, т.е. подвергнется сжиманию, что совсем недопустимо. Стр. 57 и 58 обстоятельно это показывают.

Мы рассмотрим влияние на основания в нашем проекте тяжести мотора и незначительного момента подъемной силы концов оболочки, где под ней нет гондолы. Большие же запасы горючего при переполнении средней части оболочки (подгондольной) газом могут быть распределены по всей гондоле сообразно подъемной силе отсеков. Итак, будем иметь дело с тяжестью мотора и моментами подъемной силы концов.

При часовой скорости в 78 км сила мотора составит 198 метрических сил, или 264 л. с. На каждый мотор придется 132 силы и вес в 132 кг. Если скорость дирижабля удвоить, т.е. довести до 156 км/час, то вес одного из двух моторов дойдет до 1050 кг.

Заметим, что увеличение скорости вдвое сократит вчетверо наибольший рейс, но оно выгодно в отношении нагревания водорода, так как увеличит пределы этого нагревания и его быстроту.

Подъемная сила крайнего отсека гондолы составит 629 кг (стр. 34). Если на двух-трех машинистов положить 200 кг, то все же останется 429 кг. Добавочная тяжесть будет $1054 - 429 = 625$ кг. Как будет действовать этот груз и насколько он уравновесит момент подъемной силы конца оболочки?

Стр. 59 и 60. Вычисляем моменты (стр. 60) груза в 625 кг для каждого сечения по расстоянию груза до этого сечения (стр. 59).

Стр. 61. Добавочные положительные напряжения оснований определяем, деля на диаметры сечений (стр. 49).

Стр. 62 и 63. Момент подъемной силы внегондольного конца на разные сечения узнаем, умножив его величину относительно среднего сечения (см. стр. 45 — найдем тут 20 618 кг. м) на отношение $\frac{x_1 - x}{x_1}$. Это отношение даем в 62-й строке, а момент (приблизительный) — в следующей.

Стр. 64. Тут содержится отрицательная прибавка от этой причины к натяжению оснований.

Стр. 65. Сравнивая ее с положительной прибавкой от веса мотора (стр. 60), видим, что сначала они почти уравнивают друг друга, затем преобладает отрицательная прибавка от подъемной силы концов. Обстоятельнее это видно из стр. 65.

Стр. 66 и 67. Принимая в основу натяжение оснований от давления газов (стр. 51) и изменение его, по стр. 65 найдем истинное натяжение верхнего (стр. 66) и нижнего оснований (стр. 67).

Сводная

Данные по проекту металлического

1а	Относительные расстояния до среднего поперечного сечения	0	0,1	0,2
2	Вспомогательные величины	1	0,99	0,96
3	" "	1	0,995	0,980
4	" "	1	0,9975	0,990
5	Относительная величина ординат плоской оболочки	1	0,9925	0,9698
6	Тангенсы углов плоской оболочки	0	0,0379	0,0763
7	Истинные расстояния до среднего сечения	0	6	12
8	Ординаты плоской оболочки	15	14,887	14,547
9	Удвоенные ординаты плоской оболочки	30	29,774	29,094
10	То же, с шириной одного основания	32	31,774	31,094
11	Радиусы сечений вполне надутой оболочки	10,191	10,120	9,836
12	Диаметры сечений вполне надутой оболочки	20,38	20,24	19,67
13	Площади поперечных сечений надутой оболочки	326	320	304
14	Ширина отсеков вполне надутой оболочки	3	6	6
15	Объемы этих отсеков, или конусов вполне (100%) надутой оболочки	973	1 920	1 824
16	Подъемная сила каждого отсека (1,2 кг/м³)	1 173	2 304	2 188
17	Объемы отсеков при надувании на 75%	-733	1 440	1 368
18	Подъемная сила при надувании на 75%	880	1 728	1 641
19	Удвоенная площадь боковых трапеций плоской оболочки	180	356	347
20	Вес каждой пары боковых трапеций	234	463	451
21	Вес двух отрезков оснований каждого конуса	50	100	100
22	Вес всего конического отсека	284	563	551
23	Подъемная сила каждого отсека за вычетом его веса, при 100% наполнении	890	1 746	1 637
24	То же, но при 75% наполнении газом	595	1 165	1 090
25	Разница в подъемной силе при наполнении в 100 и 75%	293	575	547
26	Вес стягивающей системы	На	1	п о г о н н ы й
27	Вес нагревательной системы	"	1	"
28	Вес гондольных тяжей	"	1	"
29	Вес покрышки гондолы	"	1	"
30	Вес пола гондолы	"	1	"
31	Вес внутреннего оборудования гондолы	"	1	"
32	Полный вес гондолы	"	1	"
33	Вес отсеков гондолы под конусами	222	444	444
34	Полезный груз каждого отсека при 100% наполнении	668	1 302	1 193
35	Полезный груз каждого отсека при 75% наполнении	373	721	646
36	Полезный груз на 1 м гондолы при 100% наполнении	223	217	199
37	То же при 75%	125	120	108
38	Продольное давление газа на разные поперечные сечения	7 824	7 680	7 296
39	Относительная величина ординат надутой оболочки (из стр. 11)	1,000	0,993	0,970
40	Отношение между давлениями газа на верхнее и нижнее основания	1,286	1,284	1,272

таблица

дирижабля на 40 человек

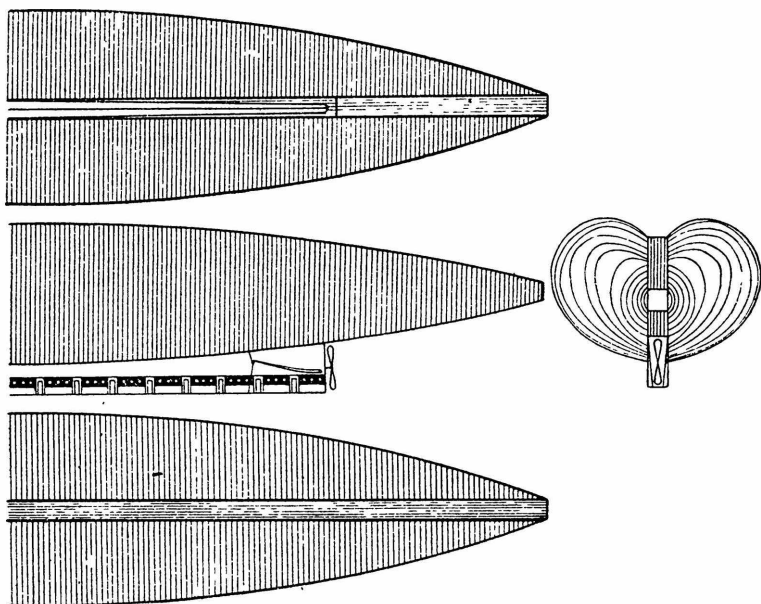
0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,91	0,84	0,75	0,64	0,51	0,36	0,19	0
0,954	0,9165	0,866	0,800	0,714	0,600	0,436	0
0,977	0,957	0,931	0,894	0,845	0,775	0,660	0
0,9317	0,8774	0,8059	0,7155	0,6035	0,4648	0,2878	0,082
0,1138	0,1584	0,2032	0,2539	0,3136	0,3902	0,5151	0,5151
18	24	30	36	42	48	54	60
13,975	13,161	12,161	10,732	9,052	6,972	4,317	1,221
27,950	26,322	24,176	21,464	18,104	13,944	8,634	2,46
29,950	28,322	26,176	23,464	20,104	15,944	10,634	4,46
9,504	9,019	8,336	7,473	6,403	5,078	3,387	1,23
19,01	18,04	16,67	14,95	12,81	10,16	6,77	2,46
283	254	219	174	128	80	35	4,92
6	6	6	6	6	6	6	3
1 698	1 524	1 314	1 044	768	480	210	35
2 037	1 828	1 576	1 252	921	576	252	42
1 273	1 143	985	783	576	360	157	26
1 527	1 372	1 182	940	690	432	189	31
335	316	290	270	217	167	104	29
436	411	377	351	282	217	135	41
100	100	100	100	100	100	100	50
556	511	477	451	382	317	235	91
1 501	1 317	1 099	801	539	259	17	—49
991	860	705	488	308	115	—46	—60
509	455	392	313	230	144	63	11
метр гондолы 12 кв							
"	"	"	1,7	"			
"	"	"	2,5	"			
"	"	"	9	"			
"	"	"	45	"			
"	"	"	6	"			
"	"	"	74	"			
444	444	444	222	Т у т г о н д о л ы н е т			
1 057	873	655	579	539	259	17	—49
547	416	261	266	308	115	—46	—60
176	146	109	201	90	43	3	—12
91	69	44	97	51	19	—8	—13
6 792	6 096	5 256	4 176	3 072	1 920	840	118
0,932	0,885	0,817	0,732	0,628	0,498	0,332	0,120
1,264	1,248	1,228	1,201	1,171	1,133	1,086	1,030

16	Относительные расстояния до среднего поперечного сечения	0	0,1	0,2
41	Продольное давление газа на верхнее основание	4 407	4 310	4 082
42	Продольное давление газа на нижнее основание	3 417	3 370	3 214
43	Расстояние центра каждого отсека до среднего поперечного сечения	1,5	6	12
44	Моменты подъемной силы отсеков относительно среднего поперечного сечения оболочки (из стр. 25 и 43)	440	3 450	6 564
45	Сумма моментов концов относительно среднего поперечного сечения (из стр. 44)	74 182	73 742	70 292
46	Сумма подъемных сил всего конца (из стр. 25)	3 532	3 239	2 664
47	Произведение чисел стр. 46 и 43	5 298	19 434	31 968
48	Момент части оболочки относительно своего сечения (из стр. 45 и 47)	68 884	54 308	3 824
49	Диаметр сечений	20,4	20,2	19,7
50	Происходящее натяжение или сжатие оснований (из стр. 48 и 12 или 49)	3 636	2 688	1 955
51	Новое натяжение верхнего основания от совместного действия вертикальных сил и давления газа	771	1 622	2 127
52	Новое натяжение нижнего основания от совместного действия вертикальных сил и давления газа	7 053	6 058	5 169
53	Расстояния груза (1716 м) до сечений. Груз помещен в концевых точках корабля	60	54	48
54	Моменты груза (1716 м), помещенного в концевых точках корабля, относительно каждого сечения	10 290	92 610	82 320
55	Натяжение оснований от конечных грузов (из стр. 49 и 54)	5 044	4 585	4 200
56	Добавочное действие груза и подъемной силы на основания	1 408	1 897	2 245
57	Натяжение верхнего основания от действия: газа, груза и подъемной силы	5 815	6 207	6 327
58	То же, но для нижнего основания	2 009	1 473	969
59	Расстояние мотора до сечений	36	30	24
60	Моменты тяжести мотора относительно разных сечений	22 500	18 750	15 000
61	Добавочные натяжения оснований (стр. 49 и 60) от веса мотора	1 103	929	761
62	$\frac{x_1 - x}{x_1} = 1 - \frac{x}{x_1}$	1	0,9	0,8
63	Моменты подъемной силы внегондольного конца оболочки	20 600	18 540	16 560
64	Отрицательное изменение в натяжении оснований от подъемной силы конца (стр. 49 и 63)	1 010	918	841
65	Совместное действие подъемной силы конца (стр. 49 и 63)	93	11	—80
66	Натяжение верхнего основания (из стр. 51 и 65) (окончат. значение — со всеми поправками)	4 410	4 321	4 002
67	Натяжение нижнего основания (из стр. 51 и 65) (окончат. значение — со всеми поправками)	3 324	3 359	3 294

0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
3 788	3 387	2 797	2 278	1 656	1 020	437	60
3 004	2 709	2 459	1 898	1 416	900	403	58
18	24	30	36	42	48	54	58,5
9 162	10 920	11 760	11 268	9 660	6 912	3 402	644
63 728	54 566	43 646	31 886	20 618	10 958	4 046	644
2 117	1 608	1 153	761	448	218	74	11
38 106	38 592	34 590	27 396	18 816	10 464	3 996	643,5
25 622	15 974	9 056	4 490	1 802	494	50	0
19,0	18,0	16,7	15,0	12,8	10,2	6,8	2,5
1 348	870,7	542,3	299,3	140,8	48,04	7,4	0
2 440	2 516	2 248	1 979	1 515	972	430	60
4 352	3 580	3 008	2 197	1 557	948	410	58
42	36	30	24	18	12	6	0
72 030	61 740	51 450	41 160	30 870	20 580	10 290	0
3 791	3 430	3 081	2 744	2 415	2 018	1 513	0
2 443	2 559	2 539	2 445	2 274	1 970	1 506	0
6 231	5 946	5 336	4 723	3 930	2 990	1 943	60
561	150	- 80	- 547	- 858	- 1 070	- 1 103	- 58
18	12	6	0	—	—	—	—
11 250	7 500	3 750	0	—	—	—	—
592	417	225	0	—	—	—	—
0,7	0,6	0,5	0,4	—	—	—	—
14 490	12 420	10 350	8 280	—	—	—	—
771	690	620	—	—	—	—	—
-179	-273	-395	—	—	—	—	—
3 609	3 114	2 402	1 979	1 515	972	430	—
3 183	3 982	2 854	2 197	1 557	948	410	—

IV. Особенности конструкции металлического дирижабля

Тут я не только описываю чертежи, но и даю дополнительные сведения о проекте дирижабля на 40 человек.



Черт. 78.

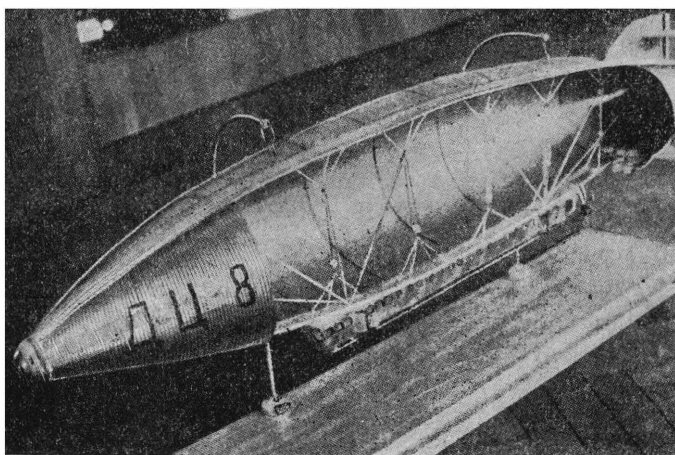
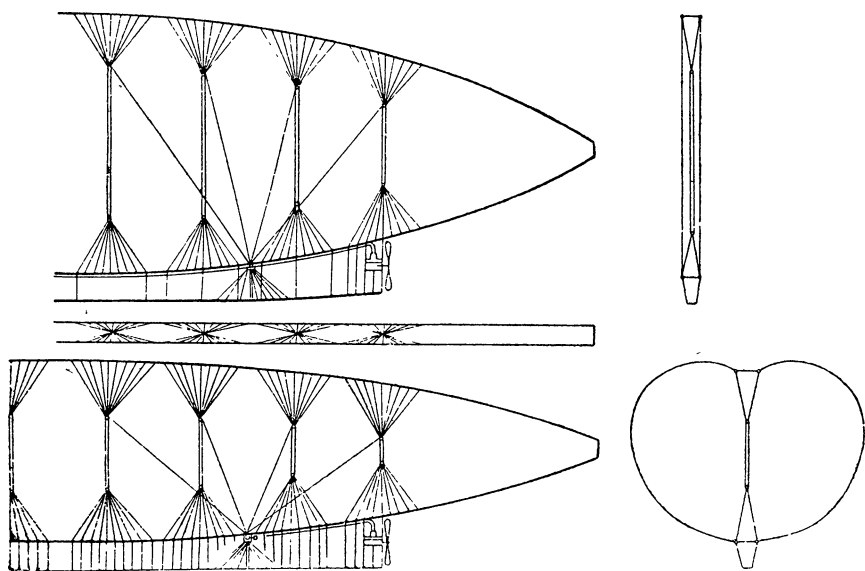


Фото 1. Модель дирижабля 8000 м³ и его стягивающей системы.

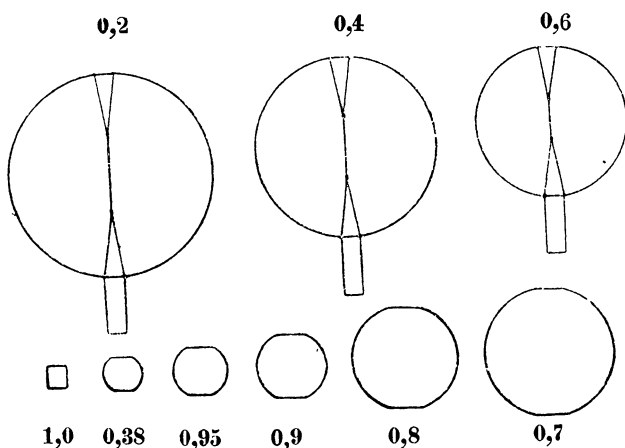
43. На чертежах изображены половины дирижаблей, так как обе половины почти одинаковы. Изображение воздушных винтов, 244

моторов, рулей и некоторых других частей — схематическое: тут видны лишь примерные размеры и площади. Показано только направление волн: величина их была бы незаметна.

44. Черт. 78 дает наружный вид дирижабля сбоку, вдоль, сверху и снизу. Показано направление волн.



Черт. 79.

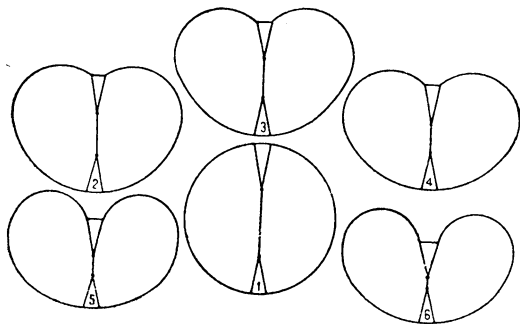


Черт. 80.

45. Черт. 79 дает понятие о стягивающей системе. Блоки, по их малости, изображаем в виде точек. Стягивающий вал и обнимающая его непроницаемая камера едва заметны.

46. Черт. 80 дает поперечные сечения одной и той же оболочки в разных расстояниях от центра (0,2; 0,4; 0,6). Относительное расстояние их от среднего поперечного сечения обозначено на чертежах. На первых трех заметна стягивающая система, на остальных ее совсем нет.

46. Черт. 81 дает форму одного и того же среднего поперечного сечения оболочки дирижабля при разных степенях его надутости. Форма эта зависит: от продолговатости оболочки, силы натяжения гофра (в боковинах), относительной тяжести оболочки, силы стягивания или давления газа и других причин.

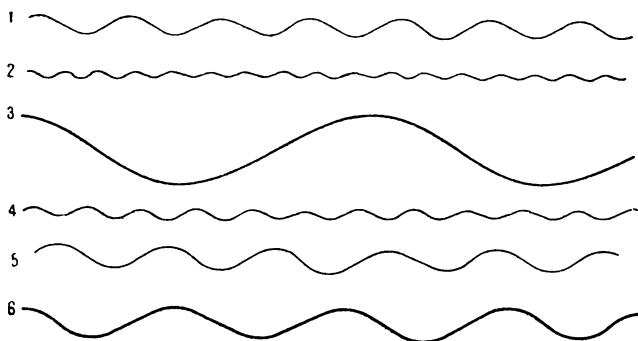


Черт. 81.

Волнистая оболочка приспособляется ко всем условиям, не давая неправильных складок.

47. Черт. 82 дает сечение боковин или волны гофра в натуральную величину. Начиная сверху, видим: 1) теоретические размеры волн (при стальной оболочке толщиной в 0,2 мм), 2) наименьшую величину волн (им грозит недостаток упругости при растяжении; это до-

пустимо, если оболочке не приходится часто выпускать весь газ и принимать плоский вид), 3) наибольшие размеры волн (им грозит при недостаточной жесткости материала образование неправильных складок и трещин в оболочке; при таких больших



Черт. 82.

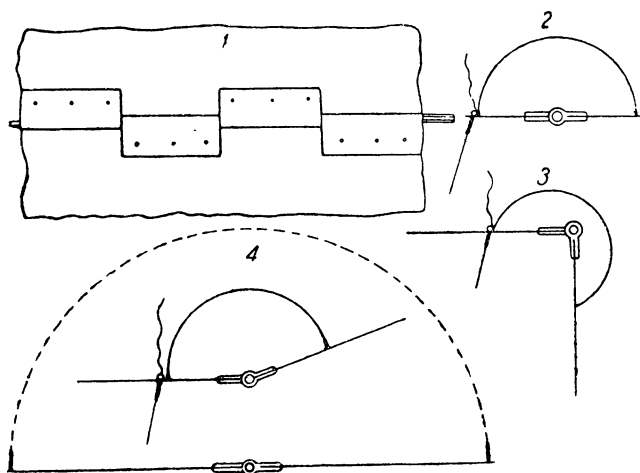
волнах пришлось бы прибегать к волнам мелким, второго порядка, покрывающим крупные волны), 4) далее видны рекомендуемые мною волны, 5) средние размеры волн, близкие к теоретическим.

48. На том же чертеже внизу видим волны основания в натуральную величину. Они продольные и в три раза крупнее

волн боковин. Но они могут быть и гораздо мельче и даже другой крутизны. Цель их — придать некоторую жесткость основаниям. Волны на них чередуются с гладкими поверхностями. Волны боковин и оснований взаимно перпендикулярны.

Гладкие поверхности остаются там, где примыкают к основаниям какие-либо органы, не могущие растягиваться.

49. Черт. 83 показывает петельное соединение боковин с основаниями в натуральную величину. Первый чертеж изображает петли и стержень сверху; второй, третий и четвертый — те же петли в поперечном разрезе, причем указано и на желоба, прикрывающие петельное соединение. Большой пунктирный полукруг дает наибольшие размеры желоба. Толщина материала



Черт. 83.

петель такая же, как и оснований (0,45). Толщина желобов такая же, как и боковин (0,15). Число петель и толщина стержня рассчитываются так, чтобы сопротивление стержня поперечному разрыву было равно поперечному сопротивлению соответствующей части боковин. Поперечное же сопротивление самих петель, бордюра и основания не только достаточно, но и в три раза больше, чем боковин.

50. Сопротивление стержня P_c на единицу длины боковины будет:

$$P_c = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{K}{n} \cdot \frac{1}{l},$$

где r есть радиус поперечного сечения стержня, K — коэффициент сопротивления разрыву, n — запас точности и l — длина петли (ширина ее не определена: чем короче, тем лучше).

С другой стороны, сопротивление разрыву единицы длины боковин P_B будет:

$$P_B = \delta \cdot \frac{K}{n},$$

где δ есть толщина боковин.

Из того и другого, приравнивая, получим:

$$l = \frac{\pi \cdot r^2}{\delta} \text{ и } r = \sqrt{\frac{l \cdot \delta}{\pi}}.$$

Полагая тут $\delta = 0,15$ мм, а длину петли l — последовательно в 10, 20, 30 мм и т. д., составим таблицу:

Таблица 3

Длина петли в мм.	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Толщина стержня в мм	1,4	1,96	2,40	2,76	3,10	3,42	3,68	3,90	4,16	4,38

Значит, чем длиннее петля, или чем число их меньше на всей оболочке, тем толще нужно делать петельный стержень. Экономия (правда, ничтожная) получается при очень коротких петлях.

На черт. 83 приняты петли в 5 см длины при стержне в 3,1 мм толщины (см. табл. 3).

Один ряд прикрепляется к основанию, а другой — промежуточный — к особому бордюру такой же толщины, как основание, и уже этот бордюр приваривается к боковинам.

На черт. 83 видим привески для прутьев стягивающей системы и для вешания дирижабля на верфи при опоражнивании и ремонте. Для больших дирижаблей привески могут надеваться на стержни между петлями. Мной было устроено много моделей, иллюстрирующих это построение.

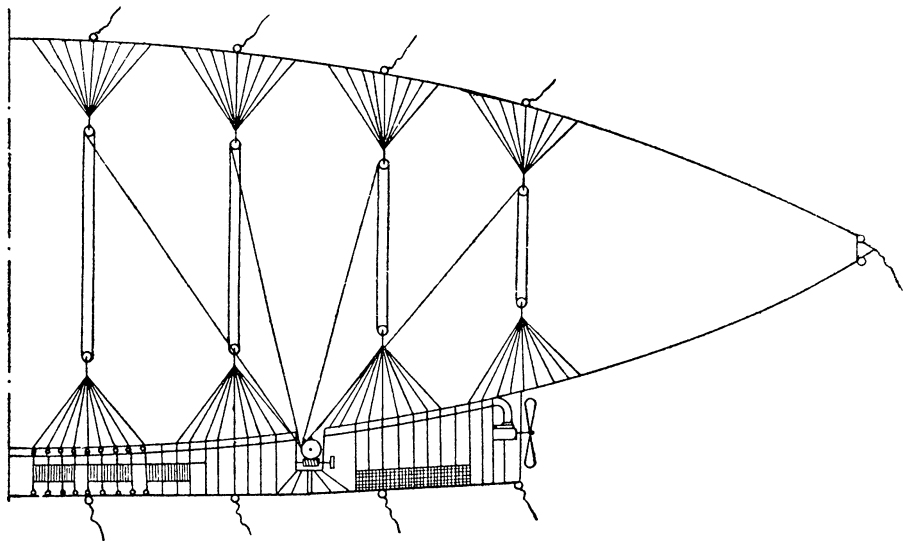
Желоба, задерживающие утечку газов, могут помещаться и внутри оболочки. Тогда необходимо сверху прикрыть от дождя и влаги. Это прикрыть может быть и герметическим, т. е. желоба могут быть и сверху и снизу двойные. Они могут устраиваться и из мягкого органического материала.

Отверстия в петлях должны делаться больше стержней, чтобы было хотя отчасти трение качения.

51. Черт. 84 изображает плоский дирижабль с крючками и кольцами для вешания самой оболочки и для прицепки к ней тросов стягивающей системы и гондолы. Прицепки указаны в большом масштабе, в противном случае они не были бы видны. Тут же показаны в таком же большом масштабе блоки, тросы, стягивающий вал с непроницаемой камерой, мотор, воздушный винт и нагревающая труба.

Прицепки обозначены не все, а только образцы и место их. Сверху они могут быть парными сообразно основанию. Назначаются они для вешания оболочки при выпуске газа. Также

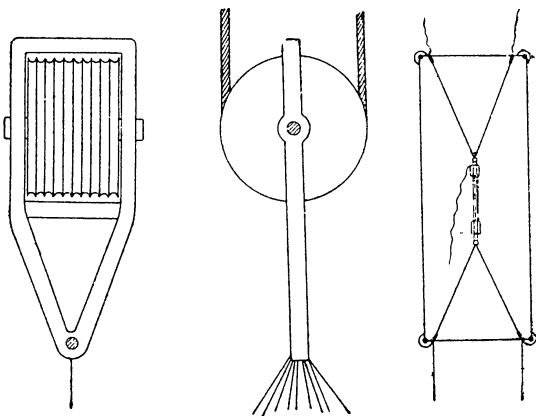
при наполнении его газом по окончании его постройки на горизонтальной платформе в плоском виде. Тут нужны и прицепки нижнего основания. Все они должны составлять как бы одно целое с внутренними тяжами. Последние могут прямо привариваться к основаниям (без колец), так как у них нет изгиба или изменения наклона в месте прикрепления.



Черт. 84.

Отвесные тяжи гондолы должны иметь прицепки сверху и снизу, потому что гондола может совершать небольшие колебания. Но можно обойтись и без этих прицепок, не особенно рискуя (или при употреблении тросов). Прицепки нижние приделаны к нижней гондольной балке (черт. 84). С них спускаются тросы, когда происходит приземление дирижабля или привязка его к причальной мачте. Последнее можно производить и посредством тросов, присоединенных к основаниям, ибо основания очень прочны на растяжение.

52. Блоки стягивающей системы (черт. 85) нужно делать из самого легкого и прочного материала, например, из отборного дерева с металлической оправой. Число колес в каждой обоймце не



Черт. 85.

меньше 5 и не больше 10. В первом случае среднее натяжение одного троса будет не более 350 кг. Действительно, среднее натяжение всех тросов не более всей подъемной силы дирижабля, т. е. 28 т (см. сводн. табл.). Число полиспастов у нас 8. число блоков в каждом — 10. Следовательно, имеем 80 тросов. Натяжение каждого будет 350 кг. При 10 колесах на одной оси (в полиспасте 20 колес) натяжение будет 175 кг.

Примем это число колес в наших полиспастах. Стальная проволока, выдерживающая это натяжение, будет иметь площадь сечения:

$$f = \frac{P}{K/n}.$$

Приняв для стали $K/n = 10 \text{ кг/мм}^2$, а натяжение 175 кг, найдем, что $f = 17,5 \text{ мм}^2$. Толщина проволоки будет 4,72 мм, а вес 1 метра 0,14 кг. Для упругого сгибания такой проволоки нужно очень

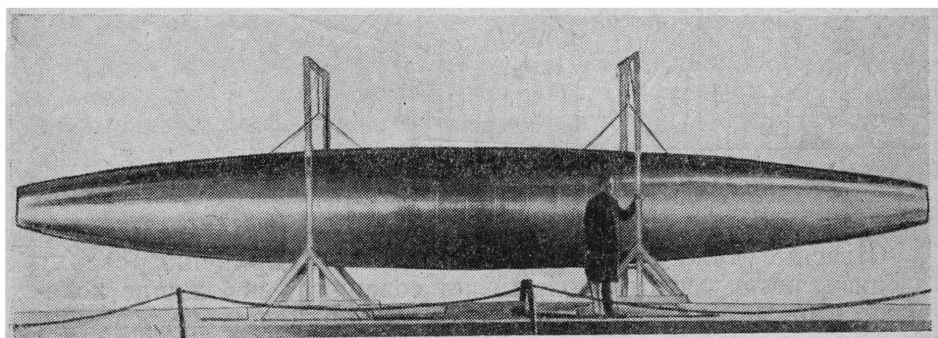


Фото 2. Модель оболочки дирижабля, сваренная из нержавеющей стали.
Длина 11,3 м.

большое и тяжелое колесо в блоке. Отсюда видно, что блочный тяж должен состоять из очень многих тонких проволок, т. е. быть тросом. Формула (272) нам дала:

$$h = y \cdot \frac{\sigma}{E},$$

где σ есть величина упругого сопротивления материала, E — модуль упругости, h — толщина проволоки, а y — радиус колеса (или радиус изгиба проволоки). Для лучшей закаленной стали $\frac{\sigma}{E} = 0,004$, см. (307). Это дает нам возможность составить следующую таблицу.

Таблица 4

Диаметр блока в см	4	6	8	10	12	14	16	18	20	30	40	50
Толщина проволоки в мм (если $\varepsilon/E = 0,004$)	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4	0,6	0,8	1,0
Толщина проволоки в мм (если $\varepsilon/E = 0,002$)	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,3	0,4	0,5

Если положить диаметр блочного колеса в 10 см, то толщина элементарной проволоки троса будет от 0,1 до 0,2 мм.

Как известно, коэффициент сопротивления таких проволок тем больше, чем они тоньше. Это представляет вторую выгоду тросов (первая же — гибкость и малость блоков). Толщина троса, ввиду этого, будет не более 5—8 мм. Отсюда видно, что толщина колеса будет не больше 1 см, а 10 колес на одной оси — не больше 10 см. Проекция каждого блока будет квадратной.

Сложный блок должен быть устроен так, чтобы трос не мог с него соскакивать.

На черт. 85 изображено устройство сложного блока. Диаметр колес принят в 16 см.

Судя по размерам и легкому материалу, каждый сложный блок со своей обоймицей не будет весить более 2—3 кг. Тогда все восемь полиспастов (16 сложных колес) будут весить не более 32 или 48 кг.

Вес стягивающей системы мы определили в 440 кг (см. сводн. табл., строка 26). Столько же мы дали на блочную систему и разные ее дополнения. Отсюда видно, что диаметр блоков может быть, без затруднений, даже в два раза больше.

Длину всех тросов приблизительно определим из чертежей в 1010 м. Вес 1 м троса около 0,14 кг. Следовательно, вес всех тросов будет 141 кг.

Повторим: на всю стягивающую систему мы дали 880 кг. Блоки поглотят не более 50 кг, тросы — 141 кг. На неподвижные тяги пойдет не более 440 кг. На стягивающий вал, его крышку и мотор останется не менее 249 кг.

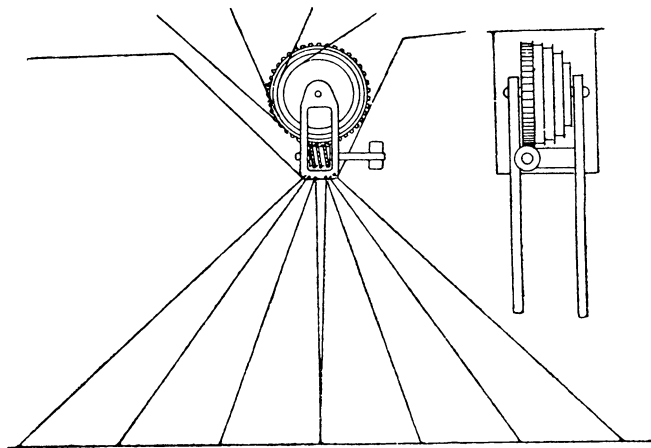
Но на неподвижные тяги мы дали чересчур много (440 кг), считая их среднюю длину в 20 м. В самом деле, отсюда надо еще исключить протяжение блочной системы. Из чертежей видно, что довольно и 300 кг, так что останется еще 140 кг, а всего 389 кг.

На черт. 79, справа, вверху приложено схематическое поперечное сечение ненадутой оболочки. Из чертежа видно: расположение шарниров, стягивающей системы, труб прикрытия, блоков и прицепок (для стягивания и вешания гондолы и самого дирижабля).

Нет особенной надобности давать большой запас прочности стержням и тросам стягивающей системы. Разрыв их неприятен, но неопасен для жизни людей. Вот гондольные тросы нужно делать особенно прочными.

53. Из черт. 79 видно, что оболочка стягивается в двух местах гондолы на расстоянии 21 м от ее середины, т. е. в 42 м друг от друга, на расстоянии в 15 м от концов гондолы (от моторов) и в 39 м от концов оболочки.

Черт. 86 показывает способ стягивания. Натяжение одного троса может достигать до 175 кг, а всех четырех — до 700 кг. Отсюда видно, что стягивающий аппарат должен быть устроен очень прочно.



Черт. 86.

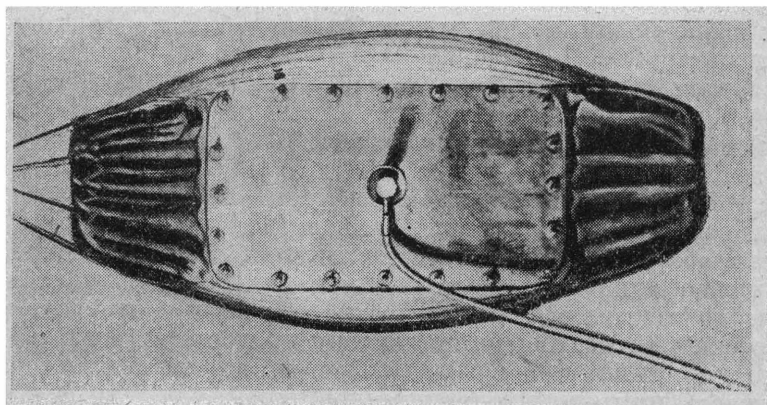
В общей металлической раме помещаются стягивающий вал с зубчатым колесом и винт (червяк), приводящий зубчатое колесо и вал в движение. Рама соединяется стержнями и тяжами с основанием гондолы и ее массивными продольными балками. Легкий чехол прикрывает машину, препятствуя утечке газов. Из него только высовывается ось червяка, приводимая во вращение особым мотором — в ту или другую сторону.

Механизм и укрепляющие его части помещаются с одного бока гондолы или посередине ее. В этом месте пол гондолы должен иметь особенную прочность. Полезно его также загрузить по расчету, чтобы уравновесить натяжение тросов.

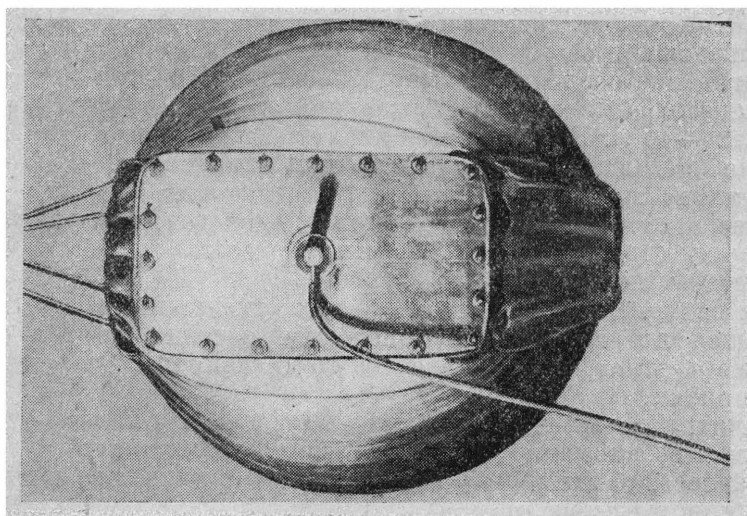
Из черт. 86 видно¹, что укрепляющие тяжи занимают около 6 м длины гондолы. Соответствующая подъемная сила (по сводн. табл.) на 1 м равна 100—180 кг, а на 6 м 600—1080 кг. Следовательно, и усиленная загрузка не нужна. Но при 5 колесах в каждой обоймце загрузка будет необходима, так как натяжение удвоится (7002 кг). Тут может быть размещен пассажирский багаж или другие грузы.

Величина стягивания разных частей оболочки тем меньше, чем меньше ее сечение. Поэтому вал делается ступенчатым, т. е. он состоит из ряда связанных между собой желобчатых колес

¹ По масштабу. *Прим. ред.*



I



II

Фото 3. Оболочка 11,3 м. Вид с торца.
I — давление 10 кг/м²; II — давление 200 кг/м².

разных диаметров. Они относятся между собой как числа: 1,00; 0,95; 0,86; 0,72 (сообразно относительному размеру поперечных сечений оболочки, где происходит стягивание). Тросы могут на всем своем протяжении остаться тросами, если концы их будут закреплены на стягивающем валу и будут на него наматываться по мере стягивания оболочки. Тогда неудобно будет делать вал малого диаметра, потому что надо много места для наматываемых тросов.

Стягивание оболочки желательно на 1—2 м. При 10 колесах на каждой обоймице трос должен при этом сматываться с блоков на 20—40 м. Если средний диаметр вала будет в 1 м, наматывание на вал 3 м троса даст на нем один виток. При стягивании же на 20—40 м получится 7—14 витков. Толщина троса не более 1 см. Следовательно, при одинаковой намотке рядом и в высоту (друг на друга) ширина и высота жолоба на колесах составят не более 3—4 см.

Как видно, можно еще диаметр вала уменьшить вдвое. Тогда получится 13—26 витков. Поперечное сечение жолоба будет не более 4—5 см, что на колесе в 50 см немного. Этот диаметр мы и примем.

Значит, каждая ступень вала займет 5 см, а 4 колеса — 20 см. Принимая во внимание еще обода или стенки желобов и зубчатое колесо, увидим, что весь вал имеет длину, не большую 30 см (при диаметре в 50 см). (На черт. 87 диаметр вала принят в 1 м.)

Зубец колеса, соединяющийся с червяком при квадратном сечении, должен быть около 1 см в поперечном сечении, так как выдерживает давление до 1000 кг. Отсюда видно, что весь стягивающий вал, с его рамой и тяжами, не может иметь очень большого веса, если сделан из хорошего материала: примерно не более 200—300 кг.

Чем выше поднимается дирижабль, тем больше приходится распускать тросы. Цель употребления червяка — не давать им распускаться самовольно от натяжения оболочки, т. е. без участия мотора или особого тормоза. Самый червяк, при определенном шаге, будет служить тормозом.

Стягивающих валов в дирижабле два. Они вообще стягивают оболочку одинаково, т. е. на одну величину.

Ради восстановления горизонтальности дирижабля при его наклонах оба вала работают в противоположном направлении.

Но можно один вал оставить в покое и действовать только другим: то заставляя его стягивать одну половину оболочки, то распускать ее же, смотря по наклону продольной оси корабля.

Если дирижабль хорошо уравновешен, погода обыкновенная и дирижабль плывет на определенной высоте, то для стабилизации довольно и одного руля высоты.

Тогда стягивание, для получения нормального давления водорода в оболочке, совсем не нужно: безопасное давление проще получается регулятором температуры. Если давление велико, то температуру понижают, дирижабль опускается и давление

становится нормальным. При низком давлении поступают наоборот.

Ввиду этого средняя часовая работа стягивания невелика, но порою, когда приходится прибегать к стягиванию, она больше. Для спуска дирижабля на 1 км нужно стянуть оболочку не более, чем на 2 м, т. е. придется поднять гондолу на эту высоту. Гондола же со всем содержимым весит не более 20 т. Значит, придется совершить работу в 40 т · м. Если спуск дирижабля на 1 км совершается в 100 сек., то работа стягивания в 1 сек. будет 400 кг · м; или 4 метрических силы. Скорость спуска будет 10 м/сек. При скорости в 5 м/сек работа будет уже в 2 силы.

При поднятии работа должна была бы выделяться обратно и в таком же количестве, если бы не червяк и его трение, поглощающее эту работу.

Итак, у каждого вала надо поставить по мотору в 2—4 метрических силы. Экономнее было бы приводить в действие стягивающую систему от главных двигателей. Расстояние до них 15 м. Наиболее экономная передача силы в отношении веса — воздушная или электрическая. Тут стягивающий вал может сразу получить мощность в 100 л. с. и более и, следовательно, работать необыкновенно быстро.

Но желательно, чтобы стягивающий вал работал независимо от главных двигателей. Поэтому придется прибегнуть к бензиновым или газовым моторам, *быстро* пускаемым в ход. Это, пожалуй, будет не менее экономно в отношении веса.

Уравновешивать горизонтальность дирижабля сразу двумя способами нельзя (например рулем высоты и стягивающей системой). Надо сначала пытаться достигнуть горизонтальности одной стягивающей системой и по возможности обходиться без горизонтального руля.

Тем более нельзя одновременно пользоваться тремя или более способами стабилизации, например присоединять к первым двум способам еще неравномерное нагревание водорода в оболочке посредством регулятора температуры.

Но пытаться одним последним способом достигать устойчивого направления продольной оси дирижабля не мешает.

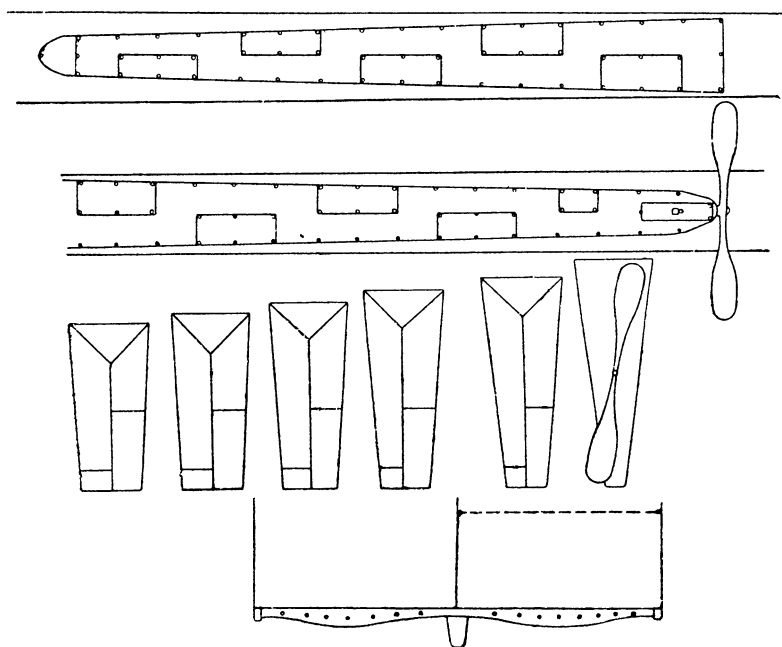
54. Черт. 87 изображает план пола для обеих половин гондолы, почти от середины до конца, т. е. на протяжении 34 м (две фигуры сверху).

Следующие фигуры дают поперечные сечения гондолы и пола.

Из плана видно, что каждый м² пола имеет по углам четыре тяжа, на которых он и висит (только к концам гондолы тяжи чаще расположены). Они составляют продолжение тяжей стягивающей системы (см. третью фигуру) и опираются на верхнюю часть оболочки с давлением газа до 5 т. Проекция тяжей обозначены на чертеже точками. Этих тяжей на всей гондоле будет 219. Они мешать движению людей не могут, так как проход между ними равен 1 м и лишь к концам гондолы меньше.

Не только пол, но и койки, столы, шкафы, сиденья и лест-

ницы опираются на них. Это делает вес коек, кресел и пр. наименьшим. Они могут даже состоять из легких полотнищ или сеток. Койки расположены друг от друга на расстоянии 1 м: одна внизу, на высоте полметра, а следующая, с той же стороны, — сверху, на высоте 2 м. На первых двух фигурах



Черт. 87.

изображены только нижние койки. Верхние не обозначены, но они подразумеваются на пустых местах чертежа, на высоте 2 м. Так они не мешают хождению людей. Проход хотя и будет извилистый, но совершенно свободный. Лишь на концах гондолы он суживается до полметра.

Койки назначаются для ночного отдыха; днем же сидят только на нижних. Всех коек 40, по числу людей. Нижних 20, но мест для сиденья и на последних довольно. Сиденье требует квадрата со стороной в 50 см, так что на одной койке (длиной в 2 м и шириной в 1 м) может сидеть 6 человек и останется еще пустое место.

Лучше всего, если нижние койки днем будут переделываться в два висячих кресла со спинками. Сидеть люди будут боком, протянув ноги вдоль гондолы: так не будет затруднен проход. Это видно также из фигуры третьей, где изображены койки.

Четвертая фигура дает поперечный разрез пола в 0,1 натуральной величины.

На первое время мы предполагаем устраивать пол из отборных кусков наиболее крепкого дерева. Доски волокнами можно располагать поперек гондолы. Они должны быть склеены и свинчены между собой, а ради непроницаемости и безопасности от огня — прикрыты тонким слоем металла или металлической непроницаемой для влаги краской. Экономия веса требует неравной их толщины (как это видно из последней фигуры).

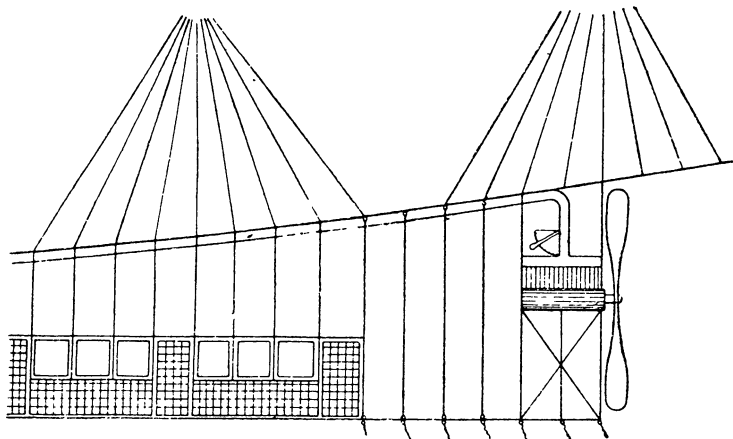
По краям и середине пола идут, ради прочности, продольные брусья. Средний брус очень массивный (тоже пока деревянный). Он служит и опорой для тросов (гайдропов), бросаемых вниз для задержки и приземления дирижабля, а также для привязки его к причальной башне (или мачте).

Чтобы не делать пол очень массивным и вместе с тем не рисковать жизнью, его снизу можно прикрыть сеткой из лучшей стальной проволоки. Если повредится пол — спасет сетка.

Конечно, со временем, полы будут делаться металлическими, но пока необходимы уступки.

Для прикрепления к причальной мачте могут служить и тросы, присоединенные к одному или двум основаниям (черт. 58 и 85).

Но соединение мачты с гондолой выгоднее, потому что не требует высокой причальной мачты; горизонтальное же выравнивание можно возложить на стягивающую систему. Сход пассажиров также тут легче. Остановка моторов у причальной мачты должна сопровождаться выходом пассажиров, вообще — уравниванием подъемной силы.

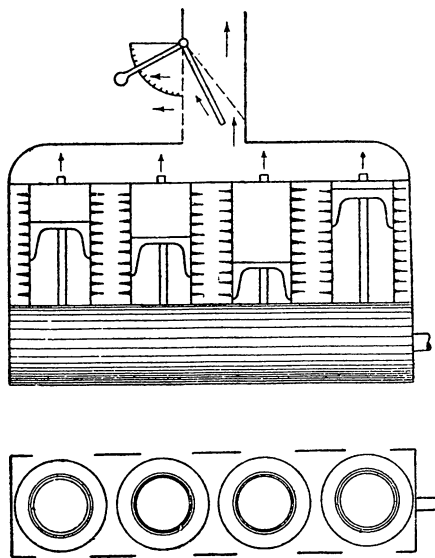


Черт. 88.

55. Черт. 88 указывает на расположение мотора, регулятора температуры и нагревающей трубы. Видим окна и двери, прикрепки гондолы и тормозные (в увеличенном масштабе, иначе они не были бы видны).

56. Подробности устройства регулятора температуры видны на черт. 89. Мотор представлен схематично. Верхняя фигура дает продольное сечение, нижняя — план.

Выходные отверстия цилиндрических газов должны быть окружены особым непроницаемым кожухом, откуда они устремляются в регулятор температуры дирижабля, состоящий из трубы с квадратным поперечным сечением. В трубе может вращаться прямоугольная заслонка, то перегораживающая плотно трубу и прекращающая дальнейший ход в ней горячих газов кверху (наклонное положение заслонки), то захлопывающая левое большое отверстие в трубе и пропускающая их тогда свободно в нагревающую дирижабль трубу (отвесное положение заслонки). В первом случае все горячие газы выбрасываются в сторону (наружу)



Черт. 89.

и почти не нагревают водород в оболочке дирижабля. Во втором, наоборот, вся масса газов устремляется в нагревающую трубу и тепло их почти целиком передается дирижаблю. В среднем случае часть продуктов горения выходит наружу, а часть — в нагревающую трубу. Ясно, что степень нагревания водорода будет зависеть от наклона заслонки.

Ее поворачивают особой рукояткой, прилегающей к циферблату. Он указывает градусы наклона или получаемую среднюю температуру нагрева дирижабля.

Чтобы теплота выхлопных газов лучше передавалась дирижаблю и меньше терялась, регулятор температуры и нагревающая труба снаружи и внутри делаются блестящими. Но вну-

тренность их скоро тускнеет и потому мы заботимся, главным образом, о блеске наружной поверхности, которую даже можем еще покрыть очень тонким блестящим с обеих сторон кожухом. Основание дирижабля снаружи тоже делается блестящим и только часть, прикрытая нагревающей трубой, должна быть черной, да самое нижнее основание внутри также должно быть черным. Оболочку же дирижабля внутри, как и снаружи, полезно делать блестящей.

Понятно, что ближайшие к регулятору температуры части оснований подвергаются сильнейшему нагреванию. Поэтому они должны делаться более толстыми (на небольшом протяжении) или, что экономнее, прикрыты непортящимся от продуктов горения слоем вещества.

57. На гондоле два мотора, два регулятора температуры и две нагревающих трубы. Одна нагревающая труба обыкновенно работает полностью, т. е. дает наибольшую температуру, благодаря

закрытому сбоку регулятора отверстию. Другая же регулирует температуру, т. е. то ослабляет свое действие и тем понижает температуру, то усиливает его и тем повышает температуру (смотря по надобности).

В иных случаях приходится действовать обоими регуляторами одновременно. Продукты горения, остывая, дают, между прочим, воду. В наиболее низком месте нагревающей трубы ставят сосуд, где вода собирается. Ее вес (если все продукты горения подвергаются охлаждению) близок к весу сожженного углеводорода и полезен для поддержания равновесия дирижабля, как и переменная температура его газа.

Выгоднее *передний* регулятор открывать полностью (т. е. все продукты горения направлять в нагревающую трубу). Тогда все тепло переднего мотора пойдет на нагревание дирижабля и не будет надобности выбрасывать продукты сгорания в носовой части оболочки. Тут выбрасывание продуктов может более беспокоить людей и пачкать дирижабль. Напротив, выбрасываемые сзади (на корме другим регулятором) продукты будут уноситься встречным потоком, не попадая на гондолу.

Наш дирижабль не может подняться, если не пустим в ход хотя бы один мотор. Также если оба мотора стали во время пути, то дирижабль будет медленно падать. Но трудно допустить, чтобы оба мотора стали одновременно. Один же (действующий) может воспрепятствовать спуску дирижабля. Если же стали оба, то дирижабль должен планировать в наклонном положении, как аэроплан. Его огромная поверхность заменит крылья аэроплана. Во всяком случае, спуск в лесу, в море или в неизвестном месте будет рискованным.

Можно было бы выкинуть балласт, чтобы остановить снижение, но в нашем дирижабле балласт (бесполезный в других отношениях груз) не полагается. Притом балласт этот составляет около тонны и запасать его неэкономно. Выбрасывать же вещи и горючее еще менее разумно.

Но можно найти много средств избежать приземления. Можно, например, пустить в действие запасный мотор, стоящий рядом с остановившимся.

Это кажется наиболее практическое средство, так как дает одновременно и поступательное движение, также необходимое для удобного спуска.

Пока запасный мотор работает с тем же воздушным винтом, остановившиеся двигатели могут быть исправлены. Иногда нужно пользоваться теплом моторов и в то же время ослабленной работой воздушного винта. Это соединимо, если лопасти винта можно поворачивать.

58. Рабочие цилиндры со своими ребрами также должны быть покрыты особым кожухом. Сильный воздушный ток от вентиляторов, проникая в него через несколько отверстий, должен достаточно и равномерно охлаждать цилиндры. Выходящий наружу и нагретый цилиндрами воздух содержит, сравнительно, немного тепла, но может служить для

отопления гондолы в холодное время или при полете на высотах.

59. Неизбежно употребление рулей направления (рыбий) и высоты (птичий), так как действие их при стремительном поступательном движении дирижабля очень сильно и быстро, хотя не мешает сделать попытку обойтись без руля высоты.

По моей работе „Соппротивление воздуха“ (напечатана в журнале „Научное обозрение“ в 1903 г.) видно, что нормальное давление на квадратный руль выражается приблизительно формулой: $P = 0,021 \cdot i S V^2$, где P — давление ветра в кг, i — угол наклона его к рулю в градусах, не превышающий $10-15^\circ$, S — площадь руля в m^2 и V — секундная скорость встречного потока, или дирижабля в м. Плотность среды предполагается в 0,0012 воды. Положив тут для нашего дирижабля $S = 6 \times 6 = 36 m^2$ и $V = 22 m/sec$, найдем $P = 366 \cdot i$. Значит, при отклонении руля на 1° от потока, давление на руль (к нему нормальное) будет равно 366 кг. Давление же при наклоне в 10° будет более 3 т. Это составляет около восьмой доли всей наибольшей подъемной силы дирижабля. Подобный же наклон оси воздушного винта никогда не может дать вертикальную составляющую такой величины. Так, по таблицам в моей работе „Дирижабль 28-го года“ (в печати не опубликована) находим давление на все винты нашего дирижабля при той же скорости (22 м), равным 509 кг. При наклоне оси винтов на 1° отвесная составляющая будет около 9 кг, а при $10^\circ - 90$ кг. Это меньше 3660 кг в 40 раз.

Также и другие средства, по быстроте своей, не могут сравниться с действием рулей.

Особенно выгодно действие руля не только при его наклоне, но еще и при искривлении. Такой руль изображен на черт. 90. Тут мы видим две его проекции. Устройство его едва ли сложнее и массивнее руля плоского. Конечно, его удобнее всего поместить позади переднего пропеллера (винта).

Устраивается он из ряда гибких стальных прутьев с натянутой между ними легкой материей (или гофрированной вдоль жестью). При управлении им конец отгибается особыми тросами кверху или книзу. Так как он расположен по бокам гондолы, то это приспособление легко устроить. Такой руль может быть сооружен без всяких шарниров. Все достигается его гибкостью.

Рули всегда, если можно, надо ставить позади пропеллеров. Тогда их действие сильнее от возбуждаемого винтом воздушного потока. Особенно полезен такой руль при начале поступательного движения дирижабля, когда он еще не приобрел большой скорости и, следовательно, от встречного воздушного потока почти не работает. Напротив, воздушный винт в это время как раз дает наибольшую отдачу (т. е. движение воздуха).

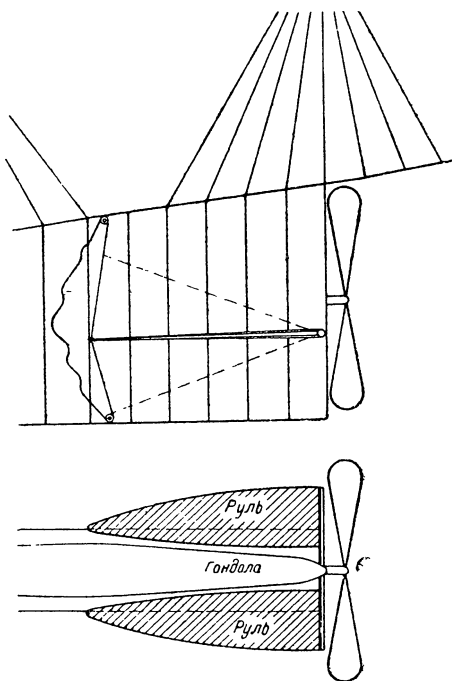
Все же действие переднего руля слабее, чем заднего, и только близкое присутствие пропеллера и удобство построения несколько искупают эту невыгоду.

Руль высоты мы могли бы поместить и позади кормового пропеллера; но это не так удобно и экономно в отношении веса. Может быть в силу его переднего положения придется увеличить его поверхность.

В больших дирижаблях, с гондолой во всю длину оболочки, все может быть поставлено иначе. В начале движения дирижабля, когда скорость его еще мала и руль высоты действует слабо, следует прибегать для получения горизонтальности к неравномерному стягиванию.

Если нельзя будет обойтись без руля высоты, то удобнее помещать его на корме, как указано на черт. 91.

60. Черт. 91 дает понятие об устройстве гибкого руля направления — таких же размеров, как и руль высоты. Он имеет на конце два перпендикулярных к нему стержня малого сопротивления. К концам их прицеплены легкие тросы, натягивая которые можем искривлять гибкий руль и тем вызывать давление на него и желаемое направление дирижабля. В общем устройство обоих рулей одинаково, только кормовая система несколько тяжелее. Но зато она действует сильнее



Черт. 90.

ввиду заднего ее положения (и притом, позади пропеллера). На этом же чертеже дан проект руля высоты, расположенного по другую сторону заднего пропеллера. Он будет работать несколько слабее руля, расположенного позади пропеллера. Но эта разница невелика, притом постройка его при гондоле очень удобна.

Общий наибольший вес всех органов дирижабля уже был указан ранее (при описании таблиц). Из этих пределов выходить по возможности не следует.

Конечно, рули можно устраивать и обыкновенные — плоские, без способности их к искривлению. В силу разных условий искривляющиеся рули неудобны для судов водяных. Для воздушных же судов они гораздо осуществимей.

61. На черт. 85, 87, 88 и 89 видим общее устройство боковых стенок гондолы, ее окон, дверей, укрепление стягивающего вала, мотора и других тяжестей.

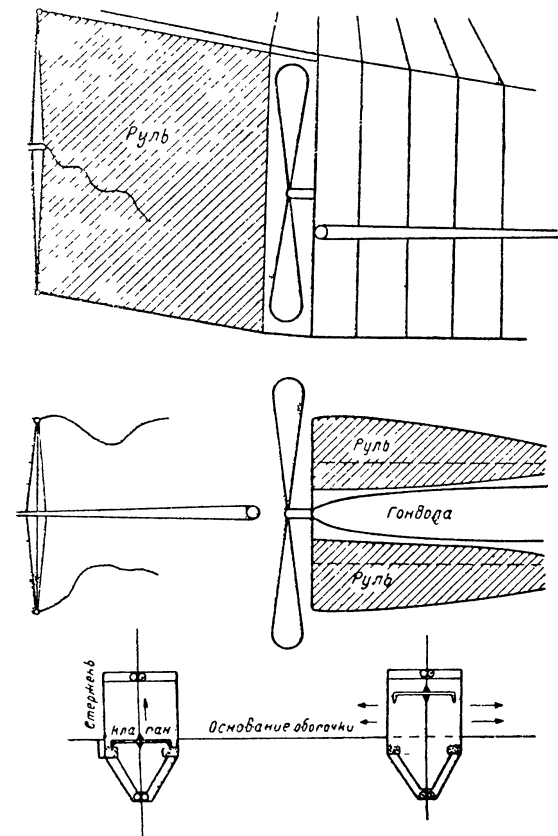
Видим укрепление пола гондолы вертикальными тяжами

длиной более 3 м. Даже сильное давление на какую-нибудь часть пола не искажает форму оболочки. Она от этого мало вдавливается. Дело в том что эти тяжи гондолы составляют непосредственное продолжение тяжей стягивающей системы. Таким образом давление на пол передается двум-трем тяжам гондолы. Они свое натяжение передают двум-трем

нижней части стягивающей системы. Это же давление передается нижнему блоку, потом верхнему, а отсюда оно распределяется на значительную долю оболочки длиной в 8 м. Ее подъемная сила составляет не менее 800 кг. Давление же газа на эту часть еще гораздо больше (около 5 т). Понятно, что вдавливание оболочки будет почти незаметно.

Также укрепляются и моторы. (на концах гондолы). Они, можно сказать, висят на верхних частях оболочки. Тяжи, идущие от рамы к полу, мешают только их раскачиванию.

На 1 м от пола идет ограждающая бока гондолы сеть из квадратных клеток размером в 25 см. Она предохраняет пассажиров от падения на случай разрыва боковых гондольных



Черт. 91.

ных покрывшек. Выше этой сети—ряд окон, каждое в 1 м². Еще выше—натяннутая покрывка для устранения в гондоле ветра и излишнего сопротивления воздуха. Между окнами—двери, также огражденные сеткой и покрытые непроницаемым для ветра слоем.

62. На черт. 91 внизу видим также верхнее основание оболочки и два предохранительных клапана. Один представлен закрытым, другой открыт и выпускает газ по направлению стрелок. Изображение схематическое. Клапан напоминает печную вьюшку и находится на уровне поверхности дирижабля, в конце верхнего основания. Выдаются наружу только стержни, напра-

влияющие движение заслонки. Движение это облегчается роликами. Клапанная вьюшка входит краями в кольцеобразное углубление, наполненное хлопком с незамерзающей жидкостью (можно употребить вместо этого и хорошую резину). Действием собственной тяжести и не изображенной на чертеже спиральной пружины (вокруг среднего стержня) клапан поддерживает закрытым. Применять вместо пружины груз — хорошо, но не экономно. Действительно, для безопасности, клапан помещается на кормовой части дирижабля, где давление газа составляет около 24 кг на 1 м². Поэтому, если совокупность клапанов имеет поверхность в 1 м², то потребуется груз, гораздо больший 24 кг, например 50 кг. Такой мертвый груз неэкономичен. Пружины же могут быть гораздо легче.

Понятно, как клапан действует. Если сверхдавление в дирижабле много выше нормы и ему грозит опасность разрыва, то это давление одолевает вес клапана и сдвигает пружину и поднимает клапан, выпуская газ. Но до этого доводить дирижабль не следует. При малейшем увеличении давления выше среднего дирижабль нужно опускать посредством регулятора температуры или уменьшать давление с помощью стягивающей системы. Так же, впрочем, поступают и при уменьшении сверхдавления, т. е. увеличивают его теми же средствами.

63. Горючее, вес которого составляет несколько тонн, нельзя сосредоточивать на одном месте, так как это вызывает вредное натяжение оснований. Его нужно распределить по всей длине гондолы в одном длинном баке, расположенном под гондолой и разделенном на перегородки.

Такая труба может заменить и массивную балку гондольного пола и потому очень экономна.

Длина гондолы 72 м. Если запас бензина принять в 5000 л, то площадь сечения трубы будет менее 7 дм², а поперечный разрез (диаметр) менее 30 см. Ввиду малого изгибания гондолы упругое изгибание трубы вполне обеспечено даже без ее поперечной гофрировки (так называемые гибкие трубы). Притом она может иметь и овальное или прямоугольное сечение.

Продольная гофрировка при малой ее массивности может придать ей и гондоле огромную жесткость.

Вес ее при употреблении стальной жести плотности 8 и толщиной в 1 мм вычислим на 1 м ее длины в 7 кг. Вес же легкого горючего на 1 м около 50 кг.

Следовательно, вес баков составит около 1/7 веса горючего. Это немного, принимая во внимание замену деревянной балки, которая сама на 1 м весит не менее 5 кг.

64. Действие мотора нельзя передавать прямо гребному винту вследствие его большого диаметра. Это невыгодно. Необходимо цепная или зубчатая передача (трансмиссия). Действительно, окружность пропеллера составляет около 18 м.

Скорость дирижабля около 30 м/сек. Значит, скорость по окружности винта будет примерно 45 м/сек. Следовательно, воздушный винт должен делать только 2,5 об/сек. Двигателю же

выгодно делать 50—100 об/сек. Значит, передача необходима и выражается числом от 1:20 до 1:40. Без передачи можно обойтись при старых дизелях, но они неэкономны по своему весу.

Отклонения и упрощения

65. В предполагаемом проекте мы допускаем разные упрощения. Так, обе половины оболочки устраиваем одинаково, т. е. нос и корма будут иметь одинаковые размеры и форму. Значит, оболочка будет симметрична относительно среднего поперечного сечения.

Для дирижаблей большого размера и более совершенных этой симметрии не будет: передняя часть оболочки будет тупее задней. Сопротивление воздуха при этом мало уменьшится, но устойчивость, а следовательно, и управление будут лучше.

66. Также нижнее основание, или нижнюю часть плоской оболочки надо бы делать выпуклей; в противном случае, при надувании и стягивании оболочки верхняя ее часть будет выпуклее нижней. Это зависит от выпирающих сверху двух длинных бугров (над продольной впадиной). Но мы пока и этим пренебрежем.

Эта неправильность (асимметрия) должна опускать нос дирижабля, что способствует компенсации действия воздушного винта, поднимающего этот нос. Таким образом эта асимметрия может быть полезной. В какой же степени — решить без опыта нельзя. Но мы всегда можем достигнуть горизонтальности дирижабля посредством стягивания.

67. Потом мы берем довольно тупой дирижабль: его продолговатость в плоском виде будет 4, а в надутом около 6. Цель — увеличить горизонтальную устойчивость и упростить стягивающую систему.

68. Конец дирижабля не может быть построен по формуле: он должен быть коническим, по крайней мере, на 0,1 полуоси от конца. Строка сводной таблицы для плоской оболочки дает производную, или тангенсы углов кривой с горизонтом. Из черт. 77 видно, что ордината конца должна быть равна (см. стр. 6 и 8 в сводной таблице):

$$4,317 - (0,515 \cdot 6) = 1,23 \text{ м.}$$

Мы из ординаты, соответствующей абсциссе $(0,9 \cdot x_1)$, вычли произведение отрезка в $0,1 \cdot x_1$, или $6 \cdot \text{м}$, на тангенс угла. Значит, высота конечного прямоугольника будет $2,46 \text{ м}$. Если оболочку чуть удлинить, т. е. концы ее, то они дойдут в высоту до 2 м , или сделаются равными в высоту и ширину. Значит, станут квадратными. Но в этом нет надобности.

69. Гондола у более совершенных больших дирижаблей бу-

дет идти во всю длину оболочки. Вполне доступно будет и верхнее основание оболочки. Размещение воздушных винтов и двигателей также будет иное. Число двигателей и воздушных винтов у больших дирижаблей увеличится.

У. Порядок практических работ при постройке металлического дирижабля

Порядок работ при построении металлического воздушного корабля предполагаю таким.

1) Построение пропорциональных моделей дирижабля, не летающих и не изменяющих свою форму и объем. Размеры от 5 до 30 см в высоту и от 30 до 180 см в длину. Кроме волн и других сравнительно мелких частей масштаб постоянный и построение подобно. (Последняя из построенных таких моделей изображена на фотоснимке 4).

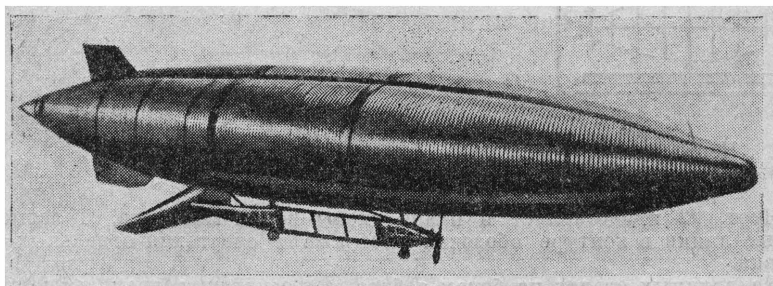


Фото 4.

2) Построение моделей нелетающих, но *отчасти упругих*, т. е. слегка изменяющих свой объем и форму без деформации. Размеры от 30 до 100 см в высоту и от 180 до 600 см в длину. Масштаб переменный. Подобие не соблюдается (картинка). (См. черт. 73 и 74.) Строится одна оболочка. Одна из таких моделей (латунная) только в 30 см высоты, обладала почти полной упругостью.

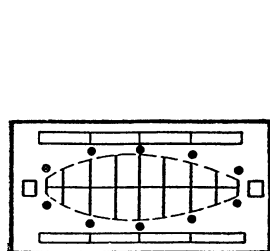
3) Модели нелетающих оболочек, изменяющих свой объем и складывающихся в плоскость без всякой деформации. Такие оболочки можно совершенно опоражнивать и снова наполнять бесчисленное множество раз без всякого вреда для их целостности. Пропорциональность или сходство с действительной оболочкой соблюдается больше. Размеры от 1 до 4 м высоты и от 4 до 16 м длины (исполнены модели в 4 и 10 м длины). (См. фотоснимки 2, 3, 4, стр. 250, 253 и 255).

4) Устройство всех деталей дирижабля в натуральную величину; каковы: волнистая поверхность боковин оболочки, шарнирное соединение, блоки, тросы, части гондолы, рули, регуля-

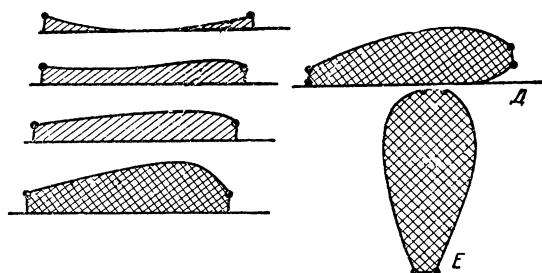
торы температуры, стягивающие валы, предохранительные клапаны и т. д.

5) *Машины-орудия* для быстрого, точного, совершенного и дешевого изготовления деталей в естественную величину. Тут, между прочим, сварочные, гофрировальные, прессовочные и прокатные машины разных размеров, назначений и устройства.

6) Верфи для построения гондол и металлических оболочек. Верфь гондолы имеет вид невысоких стоек, на которых строится и вешается гондола. А верфь оболочки — почти плоская и горизонтальная платформа или даже выравненная и цементированная поверхность земли.



Черт. 92.



Черт. 93.

Черт. 92 представляет в плане схему верфи оболочки. Толстые поперечные линии в контуре оболочки изображают очертания отдельных секций боковин.

На длинных столах по бокам собираются основания (продольные полосы), а квадраты у концов оболочки изображают места предварительной сборки носового и кормового окончаний.

Точки вокруг контура оболочки изображают невысокие столбы для подтягивания оболочки при газонаполнении и подъеме.

Черт. 93 изображает в поперечном разрезе последовательные стадии наполнения оболочки на плоской, слегка наклонной платформе, выявленные при помощи исследования в водном бассейне моделей, наполняемых воздухом.

Мертвое пространство в ненаполненной оболочке со спадающими бокален (верхняя фигура) промывается водоподом, после чего начинается газонаполнение. Когда количество газа почти достаточно для подъема оболочки на воздух, она сама поднимается и принимает отвесное положение. После этого оболочка наполняется и испытывается, а затем к ней подвешивается гондола.

7) Летающие оболочки упрощенной конструкции без гондолы. Высота от 2 до 6 м, а длина от 8 до 18 м.

8) Модели дирижаблей, поднимающие гондолу и небольшой груз в форме упрощенных органов управления, без людей, немного больших размеров, чем предыдущие.

9) Дирижабли, поднимающие от 1 до 5 человек, — упрощенные, очень нежной конструкции, негодные на практике и не приносящие дохода. Строятся ради обучения строению. Высота от 7 до 10 м, а длина от 28 до 30 м.

10) Дирижабли менее нежного устройства, хорошо управляемые, но еще непрактичные и мало доходные. Высота от 10 до 15 м, а длина от 40 до 75 м. Поднимают от 5 до 15 человек. Конструкция почти полная, с незначительными упрощениями.

11) Практические дирижабли и тем более совершенные и доходные, чем размеры их больше. Полное оборудование. Высота от 15 до 50 м, а длина от 90 до 300 м, величиной до размеров океанского парохода. Несут от 17 до 1000 чел.

Теоретические пределы дирижаблей в высоту, при современном состоянии техники, могут дойти до 300 м высоты и до подъема 200 000 чел.

Эти воздушные Левиафаны сравниваются по высоте с башней Эйфеля.

Первые три стадии уже пройдены. Если это сделано не совсем удовлетворительно, то причина в несоответствии материалов, неопытности и недостаточном оборудовании. Теперь готовятся орудия сварки частей оболочки (исполненные модели рассеяны по разным местам, отчасти испорчены переноской и повреждены при осмотре посетителями выставок; вообще их очень бы полезно построить заново).

Четвертая — уже пройдена отчасти и не может затормозиться при благополучных материальных условиях. Ведь это шаблонная работа — по готовым чертежам и таблицам.

Пятая ступень очень важна, так как от нее зависят быстрота, дешевизна и совершенство построения дирижаблей. Желательно ее основательно пройти прежде, чем начать постройку практических воздушных кораблей (хотя их можно сооружать и специально не приспособленными машинами).

Сделав известными способами возможно совершенные детали дирижабля, можно по этим данным сконструировать и соответствующие машины-орудия. Могут помочь и заграничные конструкторы, но дело так просто, что, мне кажется, мы легко справимся и сами.

Построение плоских верфей и небольших гондольных (6-я ступень) — пустое дело.

Следующая 7-я стадия — построение летающих моделей — довольно деликатна, но при наличии достаточно тонких материалов и технических средств вполне осуществима.

Следующие стадии (8—11) могут быть пройдены очень быстро при хорошем выполнении 5-й ступени, ибо от машин-орудий все зависит (т. е. быстрота и совершенство). Детали аэронаута незамысловаты и разнообразны, так что, как будто, и производство машин-орудий нетрудно.

Постепенность стадий не только избавит нас от больших расходов и непроизводительной затраты сил, но и чрезвычайно облегчит построение больших практических дирижаблей. Эта подготовка, ничего почти не стоящая в материальном отношении, избавит нас от дорогостоящих ошибок и неудач.

Выполнение первой ступени дает общее понятие о форме и

устройстве металлических дирижаблей из волнистого металла. Также — понятие об относительных размерах дирижаблей и их частей. Тут создается преимущественно художественное представление о воздушном корабле.

Вторая стадия ясно показывает возможность построения металлической оболочки, изменяющей свой объем и свою форму без вреда для целостности аэронаута. Третья утверждает то же, но в высшей степени. Четвертая будет подготовкой к конструированию машин-орудий. Она дает также понятие о натуральных размерах и солидности главных частей воздушного корабля. Гондола и органы управления будут почти в законченном виде и естественной величины.

В пятой ступени будем стремиться к упрощению деталей и производящих их машин-орудий. Она может отнять немало времени.

В седьмой стадии задаемся построением летающей упрощенной модели. Прохождение ее необходимо, так как она дает нам *наглядное понятие* об отношении сил сопротивления материалов оболочек к давлению газов и к силам тяжести. Она может дать первое практическое указание и об устойчивости аэронаута.

Остальные стадии служат подготовкой друг к другу для накопления опыта и избежания лишних трудов, жертв и расходов.

Дело дирижабля — громадное дело и польза его никак не ограничивается военными применениями. Оно заслуживает и внимания и большой работы. Оно не по силам одному лицу и одной специальности.

Работы по дирижаблю должны быть разделены между опытными, знающими, беспристрастными, молодыми и сильными лицами, в таком примерно порядке.

- 1) Выбор и испытание материалов.
- 2) Прокатка листов, стержней и пр.
- 3) Гофрировка и штамповка листов.
- 4) Проволоки и тросы.
- 5) Сварка электричеством.
- 6) Сварка ацетилено-кислородная.
- 7) Плоская верфь для построения оболочки дирижабля.
- 8) Петельное соединение.
- 9) Стягивающая система с особым двигателем.
- 10) Предохранительные клапаны.
- 11) Невысокая верфь для гондолы.
- 12) Пол гондолы.
- 13) Главные ее стержни, предохранительные сетки, оболочка, окна, двери и пассажирские удобства (отопление, кресла, койки, продовольствие и пр.).
- 14) Винтомоторная группа с регулятором температуры и нагревающей трубой.
- 15) Руль направления и, если нужно, — руль высоты.
- 16) Общая сборка оболочки дирижабля.

17) Добывание водорода.

18) Наполнение оболочки газом и соединение ее с гондолой.

19) Причалные мачты и башни.

20) Управление дирижаблем.

Все участники работ должны ознакомиться с общим проектом.

Моделисты должны сделать модели целого дирижабля и его частей—для общего наглядного ознакомления сотрудников.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора		5
К. Э. Циолковский (опыт биографической характеристики). Проф. Н. Моисеев.		7
Хронологический список сочинений К. Э. Циолковского		37

Цельнометаллический дирижабль

Предисловие редактора		45
-----------------------	--	----

Теория металлического аэростата

I. Условия равновесия, поднятия и опускания аэростата		47
II. Изменение объема аэростата		55
III. Из какого материала делать аэростат		70
IV. Некоторые условия, которым должен удовлетворять управляемый аэростат		72
V. Краткое описание металлического воздушного корабля		74
VI. Форма управляемого аэростата		79
VII. Металлическая волнистая поверхность аэростата. Растяжение и сгибание ее		97
VIII. Форма главного продольного сечения оболочки и его свойства. Поверхность оболочки и объем ее. Момент веса оболочки и момент подъемной силы газа		122
IX. Давление газа на площадь поперечного сечения аэростата. Центр этого давления		143
X. Обзорение главных сил, действующих на оболочку аэростата и на взаимные отношения		148
XI. Уклонение в деталях металлического воздушного корабля		157
XII. Расчеты некоторых деталей параболического аэростата. Вес их		
XIII. Уравнение размеров оболочки аэростата в высоту		191

Простейший проект металлического аэростата из волнистого металла

I. Описание чертежей		206
II. Преимущества		211

Общая таблица для дирижаблей от 60 до 30 м длины

I. Пояснения к таблице		216
II. Таблица		223

Материалы к проекту металлического дирижабля на 40 человек

I. Основы проекта	225
II. Некоторые теоретические замечания	226
III. Пояснения к сводной таблице	231
IV. Особенности конструкции металлического дирижабля	244
V. Порядок практических работ при постройке металлического дирижабля	265

Редактор *Е. В. Латынин.*

Технич. ред. *К. Шалимова.*

Сдано в набор 29/XII 1933 г.

Подписано к печати 13/XI 1934 г.

Формат $62 \times 94\frac{1}{16}$. Тип. зн. в бум. л. 98.176.

Тир. 2.000 — авт. л. $20\frac{3}{4}$. Бум. л. $8\frac{1}{2}$. Заказ № 1991.

Изд. № 402. Инд. А—40-5-4. Уполн. Главлита № В-89846.

Замеченные опечатки.

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
36	5 сверху	фактнесом ненный	факт несомненный
36	14 „	статья	остаться
46	12 „	заказов	заново
54	13 „	$\left(\frac{\partial p_B}{p_B} = \frac{\partial T_B}{T_B} \right)$	$\left(\frac{\partial p_B}{p_B} - \frac{\partial T_B}{T_B} \right)$

Циолковский. Избранные труды кн. I.

