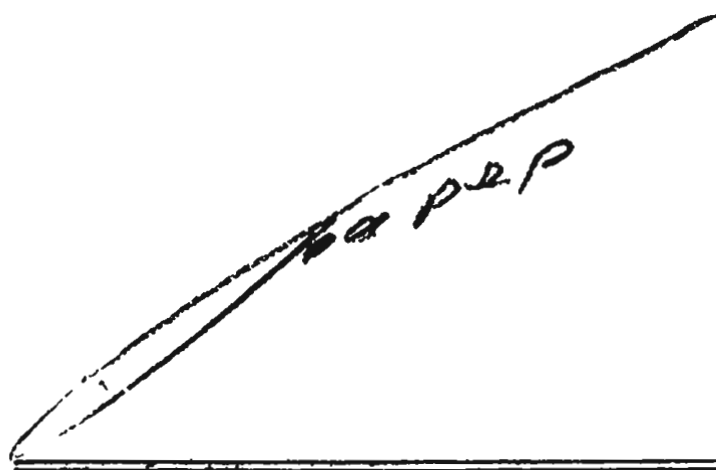


ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET
THÉORIQUE DE LA
DÉCOMPRESSION EXPLOSIVE
ET DE SES EFFETS
PHYSIOLOGIQUES

PAR
FRANÇOIS VIOLETTE



PARIS

ФРАНСУА ВИОЛЕТТ

ВЗРЫВНАЯ ДЕКОМПРЕССИЯ
И ЕЕ ДЕЙСТВИЕ
НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

*Перевод с французского
Л. И. БОРЕВОЙ*

*под редакцией
кандидата медицинских наук
А. В. ЕРЕМИНА*

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1961

Франсуа Виолетт

**ВЗРЫВНАЯ ДЕКОМПРЕССИЯ И ЕЕ ДЕЙСТВИЕ
НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА**

Перевод с французского

В книге крупного французского авиационного физиолога Франсуа Виолетта подробно рассматривается вопрос о влиянии на организм человека быстрого уменьшения барометрического давления (декомпрессии), связанного с нарушением герметичности кабины самолета на большой высоте. Приводится математический расчет и экспериментальное подтверждение законов истечения газов из легких и из кабины в условиях быстрой (взрывной) декомпрессии. Даются рекомендации по конструированию кабины современных самолетов с учетом максимальной безопасности летного состава и пассажиров.

Книга будет полезна для авиационных врачей, авиационных конструкторов, слушателей военных академий, студентов высших учебных заведений и других читателей, интересующихся вопросами покорения человеком стратосферы и космического пространства.

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Предлагаемая советскому читателю монография французского физиолога профессора Франсуа Виолетта «Взрывная декомпрессия и ее действие на организм человека»^{*} посвящена одному из актуальнейших вопросов авиационной физиологии — вопросу о влиянии на организм резких перепадов барометрического давления — и является наиболее значительной работой в этой области.

Исследование влияния на организм быстрых перепадов барометрического давления началось за рубежом примерно с 1936 г., когда развитие авиации привело к необходимости создания самолетов, оборудованных герметическими кабинами. Герметические кабины, в которых поддерживается избыточное по отношению к окружающему давление, позволяют летать практически на любой высоте. Если же герметичность такой кабины нарушается, происходит более или менее быстрое истечение воздуха из кабины в окружающую атмосферу и давление в кабине быстро уменьшается. Это уменьшение давления и называется декомпрессией. Что произойдет с летчиком в случае разгерметизации кабины? Какое действие оказывает быстрая декомпрессия на организм человека? Как предохранить экипаж или пассажиров самолета от возможной опасности? Эти и ряд других вопросов решались многими учеными, работы которых в виде отдельных небольших сообщений появлялись в периодической зарубежной печати.

Заслуга Ф. Виолетта в том, что он первый собрал и обобщил эти многочисленные работы американских, немецких и французских исследователей, систематизировал их и критически оценил. Автор провел и большие собственные исследования в этой области, разработав и применив для этого оригинальную аппаратуру. Хорошо понимая значение

^{*} Монография опубликована в научно-техническом бюллетене министерства авиации Франции Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'air. Bulletins des services techniques, Paris, 1955.

специальной техники, позволяющей производить перепады давления за весьма короткие промежутки времени (порядка нескольких миллисекунд), и приборов, позволяющих точно регистрировать происходящие при этом явления в кабине и в организме человека или экспериментального животного, автор уделяет много внимания обоснованию и техническому описанию аппаратуры, применявшейся им самим и другими исследователями. Специалисты найдут в этих описаниях немало интересного и полезного.

Но ценность работы Ф. Виолетта не только в разборе и описании методик и аппаратуры. Автор задался целью логически осмыслить и математически проанализировать накопленный учеными материал, вывести определенные закономерности и на основании их дать конкретные рекомендации по обеспечению безопасности человека в условиях быстрой, или взрывной, декомпрессии. Он тщательно и подробно исследовал и, используя положения классической термодинамики, обосновал закон декомпрессии в кабине самолета и закон истечения газа из легких во время декомпрессии в кабине. На основании большого экспериментального материала Ф. Виолетт установил условия безопасности человека при весьма быстрых перепадах барометрического давления.

В книге есть ряд слабых мест и не совсем точных положений. Она несколько перегружена математическими формулами, что затрудняет ее чтение недостаточно искусственным в математике читателем. Предложение автора характеризовать декомпрессию по величине отношения начального давления к конечному $\left(R = \frac{p_{\text{нач}}}{p_{\text{кон}}}\right)$ и по величине коэффициента утечки F , равного отношению площади S отверстия истечения к объему V полости, из которой истекает газ, является недостаточным и обязательно должно быть дополнено величиной разности начального и конечного давлений. В противном случае для условий больших высот, когда конечное давление практически равно нулю и отношение $R = \frac{p_{\text{нач}}}{0}$ становится бесконечно большим при любой, даже весьма малой, конечной величине $p_{\text{нач}}$, ни R , ни F не могут достаточно правильно характеризовать декомпрессию.

Более серьезная неточность Ф. Виолетта, которая привела его к неправильному выводу, заключается в том, что для установления закона декомпрессии в легких он предла-

гает изучать истечение газа из легких после окончания декомпрессии в кабине. Естественно, что в этом случае декомпрессия в легких, как и декомпрессия в кабине, происходит при постоянном (и одинаковом!) внешнем давлении, а значит, законы декомпрессии в кабине и в легких будут иметь одинаковое математическое выражение. Однако такой метод пригоден только для исследования перепадов давления в кабине, протекающих в течение сотых или тысячных долей секунды, и при условии, что коэффициент утечки кабины будет значительно больше коэффициента утечки легких. Если же эти коэффициенты утечки близки по величине, декомпрессия в легких будет происходить в о время декомпрессии в кабине, т. е. при меняющемся внешнем давлении. Ясно, что в этом случае условия истечения газа из кабины и из легких неравноценны и закон декомпрессии в легких не идентичен закону декомпрессии в кабине.

Неправильный методический подход автора к изучению декомпрессии в легких приводит его к неверному и практически невыполнимому выводу, который предлагается как первое условие безопасности при взрывной декомпрессии: для предупреждения возникновения в легких избыточного давления, которое может вызвать повреждение легких, необходимо, чтобы декомпрессия в кабине протекала медленнее, чем декомпрессия в легких. Ясно, что если давление в легких не будет превышать давление окружающего воздуха, то ни истечения газа из легких, ни расширения последних происходить не может.

В целом книга Ф. Виолетта является весьма ценным и полезным трудом, имеющим большое значение как для физиологов и авиационных врачей, так и для авиационных конструкторов. Попытка автора установить математическую зависимость некоторых процессов, происходящих в организме, несомненно найдет последователей и приведет к более точным и широким исследованиям в области быстрых перепадов барометрического давления, а выведенные им закономерности позволят инженерам рассчитывать и конструировать кабины самолетов с учетом максимальной безопасности экипажа и пассажиров в случае нарушения герметичности кабины.

Бурное развитие во многих странах высотной и особенно стратосферной авиации, запуск в Советском Союзе кораблей — спутников Земли и впервые осуществленные в истории человечества успешные длительные полеты советских лет-

чиков-космонавтов Ю. А. Гагарина и Г. С. Титова в космическое пространство ознаменовали начало новой эры — эры космических и межпланетных полетов. Это делает еще более актуальной проблему защиты пилота и пассажиров новых летательных аппаратов от пагубного действия низкого давления воздуха на больших высотах. Вот почему вопросы безопасности человека при полетах на больших высотах начинают интересовать все больший круг специалистов различных областей медицины и техники. Книга Ф. Виолетта поможет им разобраться в таком сложном явлении, как взрывная декомпрессия, сопровождающая разгерметизацию кабины самолета или космического корабля.

Несмотря на свой специальный характер, книга Виолетта будет интересна и полезна широкому кругу читателей, живо интересующихся вопросами завоевания человеком стратосферы и космического пространства.

А. В. Еремин

ВВЕДЕНИЕ

Использование в авиации герметических кабин с избыточным по отношению к внешней атмосфере давлением позволяет осуществлять полеты на больших высотах, обеспечивая защиту экипажа и пассажиров от губительного для организма человека влияния этих высот. Однако в этих случаях надо помнить о возможности внезапной потери избыточного давления, опасность которой нельзя недооценивать.

Потеря избыточного давления (декомпрессия) может быть относительно медленной (нарушение системы герметизации, повреждение компрессора) или быстрой (пробоина в фюзеляже, иллюминаторе или в остеклении фонаря). Влияние на организм медленной декомпрессии хорошо известно и может быть предупреждено. В случае же быстрой декомпрессии (или, как принято говорить, взрывной) необходимо еще выяснить, может ли скорость декомпрессии повлиять на состояние организма и не представляет ли она дополнительную опасность.

Изучению этой проблемы были посвящены многочисленные исследования различных авторов. Результаты их исследований были достаточно квалифицированными, но противоречивыми. До настоящего времени эта проблема не имеет еще теории, исчерпывающе объясняющей наблюдаемые при декомпрессии явления. Поэтому мы решили вновь рассмотреть различные работы, стараясь, с одной стороны, устранить в них противоречия, скорее кажущиеся, чем реальные, и, с другой стороны, логически осмыслить полученные экспериментальные данные и найти для них математическое выражение. Наше исследование, не претендующее на исчерпывающую полноту изучения этого весьма обширного предмета, привело к некоторым интересным результатам, важным как с точки зрения теоретической физиологии, так и с точки зрения практического применения.

Логично разделить наше изложение на две части.

1. Теоретическое и экспериментальное исследование изменений давления внутри закрытых полостей в зависимости от времени.

2. Физиологические последствия этих изменений давления.

Этой работе мы предположим историческую справку и изложение особенностей применявшихся нами методик, аппаратуры и приспособлений.

Наши исследования позволили установить в декомпрессии два взаимосвязанных фактора:

1) коэффициент утечки F , т. е. отношение площади отверстия, через которое происходит выход газа из кабины (отверстия декомпрессии), к объему кабины;

2) отношение R начального давления к конечному давлению, или (для краткости) отношение давлений.

Введение этих факторов позволяет нам классифицировать декомпрессии, что является весьма удобным как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Откладывая по оси абсцисс значения коэффициента утечки, а по оси ординат — величину отношения давлений, можно получить кривую, соединяющую точки, характеризующие декомпрессии, способные вызвать различные повреждения в организме. Такой график позволяет достаточно точно определять заранее зоны опасных и зоны безопасных декомпрессий.

Прежде всего дадим определение взрывной декомпрессии. Будет не точно, если мы просто скажем, что взрывная декомпрессия является декомпрессией весьма резкой, внезапной. Необходимо найти такое определение, которое можно было бы выразить в цифрах.

В 1935 г. Армстронг [2] предложил называть взрывной всякую декомпрессию, соответствующую скорости подъема, превышающей 1500 м/мин. Хотя это определение и соблазнительно, но имеется достаточно оснований, чтобы признать его неудачным. Ограничимся лишь указанием, что физический эквивалент взрывной декомпрессии, предложенный Армстронгом, был получен им при выпуске газа из резервуара объемом в 1 м³ через отверстие в 14 мм², сделанное большим гвоздем.

По нашему мнению, не следует полностью принимать определение Армстронга, однако целесообразно сохранить разделение декомпрессий на медленные и быстрые (или взрывные).

Мы предпочитаем следующее определение взрывной декомпрессии: декомпрессия называется взрывной, если налицо имеются два условия:

- 1) коэффициент утечки выше $1/100 \text{ м}^2/\text{м}^3$;
- 2) отношение давлений выше 2,3.

Это определение, правильность которого будет доказана ниже, позволяет относить к взрывной всякую декомпрессию, которая может представлять опасность для организма, и исключить при обсуждении литературных данных и в историческом обзоре из этого ряда декомпрессию с коэффициентом утечки, недостаточным, чтобы вызвать в организме какие-либо повреждения.

Глава I

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Когда прогресс авиационной техники привел к необходимости разработки кабин с избыточным давлением, многие авторы были убеждены, что внезапная потеря избыточного давления в кабине может повлечь за собой гибель пассажиров или, в лучшем случае, вызвать серьезные повреждения легких.

Но это было только гипотезой, которой не доставало экспериментального подтверждения. Работы по изучению влияния на организм быстрой декомпрессии были начаты в 1936 г. и продолжаются до настоящего времени.

При изложении упомянутых работ мы в каждом отдельном случае будем указывать условия декомпрессии с обозначением коэффициента декомпрессии и отношения давлений, которые мы каждый раз подсчитывали и которые позволят нам сравнить экспериментальные данные, полученные в различных условиях.

ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение взрывной декомпрессии было начато в США в 1936 г. Армстронгом [2] и Геймом [46] в Лаборатории авиационной медицины; во Франции — в 1938 г. Гарсо [33, 57] в Научно-исследовательской лаборатории медицинской службы гражданской авиации и Бержере и Жиорданом [5] в Лаборатории медико-физиологического изучения летчиков военной авиации.

Для изучения взрывной декомпрессии различные авторы использовали однотипную методику двойной камеры. По этой методике одна камера малого объема, имитирующая кабину самолета, так называемая малая камера, или «кабина», помещается внутри большой камеры или располагается снаружи и может быть моментально соединена

с последней. Давления в малой и большой камерах, установленные по желанию экспериментатора, позволяют создавать все необходимые соотношения давлений. Декомпрессия достигается внезапным образованием отверстия в стенке малой камеры.

Армстронг и Гейм использовали для этого или открытие специального отверстия в стенке малой камеры, или открытие особой дверцы. Недостатком использования такого механизма является то, что в начале декомпрессии вводится переходная фаза, связанная с изменяющейся площадью отверстия, и таким образом уменьшается начальная скорость декомпрессии.

Гарсо, а также Бержере и Жиордан закрывали отверстие декомпрессии целлофановым листом, а затем мгновенно разрывали последний при помощи ударного механизма, приводимого в действие извне. Этот очень простой прием, однако, представляет значительный прогресс в технике воспроизведения взрывной декомпрессии.

Опыты Армстронга и Гейма на животных проводились при коэффициенте утечки от $\frac{3}{10000}$ до $\frac{5}{1000} \text{ м}^2/\text{м}^3$. Исследования Армстронга с участием человека были выполнены при коэффициенте утечки $\frac{1}{3,9} \text{ м}^2/\text{м}^3$ и при отношении давлений 1,8. Эти величины основных параметров декомпрессии в упомянутых экспериментах были ниже тех, при которых могут наблюдаться повреждения в организме.

Такие же исследования проводили Бержере и Жиордан на собаках. В их опытах, несмотря на коэффициент утечки, меньший $\frac{1}{10} \text{ м}^2/\text{м}^3$, отношение давлений варьировало от 1,65 до 2,3.

Хотя в подобных экспериментальных условиях Бержере и Жиордан не наблюдали серьезных или смертельных последствий для собак, они сделали весьма осторожный вывод о безвредности взрывной декомпрессии, ибо находили у собак кровотечение в виде капель, выступающих из барабанной перепонки, и значительное вздутие вен основания средней черепной ямки, что заставляло опасаться возможных лабиринтных и мозговых повреждений.

Некоторые опыты Гарсо проводились на различных видах животных с коэффициентом утечки $\frac{1}{70} \text{ м}^2/\text{м}^3$, который может рассматриваться как предел переносимости. В других опытах с коэффициентом утечки $\frac{1}{6,25} \text{ м}^2/\text{м}^3$ и отношением давлений обычно выше 2, напротив, создавались условия, достаточные для получения слабых повреждений легких. Однако, хотя Гарсо в ряде опытов констатировал

парез задних конечностей, в своей работе он ограничивается тем, что отмечает хорошую общую устойчивость и выживаемость экспериментальных животных. Совместимость легочных повреждений с явно хорошей переносимостью была показана в дальнейшем Смитом [67], а затем Хитчкоком [20].

Таким образом, исследования Армстронга, Гарсо и Бержере показали, что взрывные декомпрессии являются менее опасными, чем предполагалось, и что в экспериментальных условиях основная опасность была связана единственно с действием конечной высоты.

Можно еще задать вопрос: существует ли предел переносимости взрывной декомпрессии? Немецкие исследования хотя и внесли некоторые новые данные, однако не дали ответа на этот вопрос.

НЕМЕЦКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В Германии изучение влияния на организм взрывной декомпрессии было начато в 1939 г., но было ограничено практическими целями, имитируя возможный максимум скорости декомпрессии (разрыв или распадение стекла в кабине). Несколько сот опытов проводилось с коэффициентом утечки $1/41 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и отношением давлений, превышающим 2,3. Декомпрессия достигалась отодвиганием иллюминатора, закрывающего отверстие декомпрессии. Заметим, что такая техника представляет неудобство, как это уже отмечалось при рассмотрении опытов Армстронга [2], ибо в начале декомпрессии сечение отверстия декомпрессии изменяется и начальная скорость весьма невелика.

Бенцингер [3, 4] в 1943 г. более чем на трехстах опытах доказал абсолютную безвредность подобной декомпрессии, за исключением опасности кислородного голодания, однако два серьезных случая обязывали к соблюдению осторожности. Во время этих опытов два испытуемых после декомпрессии были близки к обмороку, причем у них наблюдались преходящие признаки паралича и некоторой заторможенности, по-видимому, мозгового происхождения, которые приписывались газовой эмболии*.

* Газовая эмболия — попадание в кровеносный сосуд пузырьков свободного газа, препятствующих прохождению крови по сосуду и тем самым нарушающих нормальное кровоснабжение органа. — Прим. ред.

Дёринг и Кёниг экспериментально показали, что взрывная декомпрессия может вызвать газовую эмболию при следующих условиях.

1. Если имеется препятствие для выхода газа из легких, как, например, закрытие голосовой щели.

2. Если декомпрессия достаточна для того, чтобы:

а) привести легкое (голосовая щель закрыта) в растянутое состояние, превосходящее его жизненную способность;

б) держать легкое в растянутом состоянии в течение достаточного времени при избыточном давлении (по меньшей мере 80 мм рт. ст.).

Эта теория позволила авторам подсчитать для различных фаз дыхания величину декомпрессии, которая может привести к опасным последствиям при закрытой голосовой щели.

Правильность указанных выше условий возникновения газовой эмболии подтверждается двумя случаями, описанными Бенцингером.

Немецкие исследования привели к важному выводу: в случае опасности возникновения декомпрессии необходимо сохранять голосовую щель открытой, причем сохранение этого положения может быть осуществлено без особых трудностей, исключая случаи кашля или глотания.

Окончательное заключение Бенцингера [4] таково: в экспериментальных условиях, т. е. при коэффициенте утечки $1/41 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и при открытой голосовой щели, взрывная декомпрессия является безопасной; эта точка зрения сходится с мнением Армстронга [2], Гарсо [33, 57] и Бержере [5]. Однако, увеличив еще более и коэффициент утечки, и отношение давлений, американские авторы достигли и даже превысили предел устойчивости некоторых органов при быстрой декомпрессии.

АМЕРИКАНСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Начиная с 1940 г. в США существуют две противоположные концепции о механизме действия взрывной декомпрессии.

Одна из них — концепция Армстронга, который после описанных выше исследований пришел к выводу, что

единственно опасное действие оказывает конечная высота, скорость же декомпрессии не представляет опасности.

Другая — концепция Бенке, согласно которой расширение газов, содержащихся во внутренних полостях организма, в частности в легких, может создавать в них избыточное давление во всех случаях при закрытой голосовой щели, а также при открытой щели, если скорость декомпрессии в камере превышает максимальную скорость выделения газа из легких. По этой концепции причиной несчастного случая может быть либо местное растяжение и разрыв легких, либо газовая эмболия.

Первые исследования не принесли достаточно убедительных данных в пользу какой-либо из этих двух концепций. Возникла необходимость в дальнейших исследованиях по изучению взрывной декомпрессии, которые были широко предприняты в различных лабораториях США под руководством Лаборатории авиационной медицины. Совокупность этих исследований составляет весьма ценный труд по решению некоторых частных вопросов проблемы взрывной декомпрессии.

Эти исследования можно разделить на следующие три группы:

А. Экспериментальные исследования на животных.

Б. Экспериментальные исследования с участием человека.

В. Совместные исследования Гэге и Свиней.

А. Экспериментальные исследования на животных

В 1941—1942 гг. в Лаборатории авиационной медицины Смит [67] с целью определения устойчивости собак, кроликов и крыс подверг этих животных декомпрессии, соответствующей разности высот от 2400 до 13500 м, за время 19 мсек. Эти экспериментальные условия соответствовали коэффициенту утечки $1/1,8 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и отношению давлений 5,1 (как это можно подсчитать по табл. 1). Все животные, как оставшиеся в живых, так и погибшие, сразу после опыта подвергались вскрытию. Часть кроликов погибла от легочного кровотечения. Собаки и крысы выжили все, но вскрытие показало наличие значительных кровоизлияний в легких. У собак кровоизлияния в легких были менее обширны.

Зависимость атмосферного давления от высоты
(международная стандартная атмосфера)

Высота над уровнем моря, км	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Высота над уровнем моря, км	Атмосферное давление, мм рт. ст.
0	760,0	8	266,6
0,5	716,0	8,5	247,8
1	673,8	9	230,0
1,5	634,0	9,5	213,6
2	596	10	197,8
2,5	560	10,5	183,0
3	525,8	11	169,2
3,5	493	11,5	156,5
4	462	12	144,6
4,5	432,6	12,5	133,6
5	404,8	13	123,4
5,5	378,6	13,5	114,2
6	353,6	14	105,4
6,5	330,0	14,5	97,4
7	307,8	15	90,0
7,5	286,8		

Эта декомпрессия превысила ту критическую величину, которую легкие кролика и крысы могут перенести без видимого ущерба, поэтому Смит сделал вывод, что, даже если общая устойчивость животных к взрывной декомпрессии может казаться хорошей, устойчивость некоторых внутренних органов может быть довольно низкой.

С 1942 по 1945 г. ряд исследований влияния взрывной декомпрессии на организм был предпринят Хитчкоком и его сотрудниками [20, 85—88] в Колумбийской лаборатории. Целью их исследований, проводившихся в основном на собаках, было изучение общей устойчивости животных [85], повреждений внутренних органов и механизма их образования [20], а также физиологических изменений и их механизма [85, 86].

Эти исследователи использовали коэффициенты утечки $1/1,95$, $1/4,3$, $1/6,7$, $1/12$ и $1/48$ м²/м³ и отношения давлений от 6 до 3,7 соответственно разности высот 3000/15000 и 3000/12000 м. Авторы отмечают, что в таких условиях эксперимента лабораторные животные выживают как при однократной, так и при повторяющейся с интервалом в несколько дней взрывной декомпрессии. Декомпрессия не вызывает никаких нарушений в деятельности центральной нервной системы.

Немедленное вскрытие показывает, что при минимальном коэффициенте утечки $1/48 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и отношении давлений 6 или 3,7 почти постоянно наблюдаются [20] повреждения в легких, более редко встречаются мозговые повреждения и совершенно отсутствуют повреждения кишечника и [88] пузырьки свободного газа внутри сосудов. Таким образом, ранний аэроэмболизм не является, как это предполагали ранее, дополнительной опасностью, вызванной взрывной декомпрессией. Повреждения в легких состоят из кровоподтеков и точечных кровоизлияний. Повреждения мозга и его придатков наиболее часто представлены кровоизлияниями под твердой мозговой оболочкой.

Хитчкок [87], кроме того, показал, что ограничение расширения грудной клетки приводит к увеличению частоты и обширности повреждений в легких. Это исключает происхождение легочных повреждений в результате механического разрыва ткани легкого. Когда был произведен анатомический контроль через 24 час после декомпрессии (причем в течение этого времени у животного не наблюдалось никаких нарушений ни со стороны равновесия, ни со стороны общего поведения), то при вскрытии были обнаружены начальные признаки рассасывания кровоизлияний. У других собак, наблюдавшихся в течение семи месяцев после декомпрессии, не было обнаружено никаких функциональных нарушений; вскрытие также показало отсутствие, а следовательно, исчезновение повреждений.

Физиологи Колумбийской лаборатории особенно подробно изучали влияние взрывной декомпрессии на сердечно-сосудистую систему [85] и на изменение давления спинномозговой жидкости [86] анестезированной собаки. При этом наблюдались урежение пульса и преходящее понижение кровяного давления (гипотония), когда максимальный коэффициент утечки был выше или равнялся $1/12 \text{ м}^2/\text{м}^3$ при максимальном отношении давлений 3,7. При одном и том же отношении давлений гипотония увеличивается пропорционально увеличению коэффициента утечки, а при одинаковом коэффициенте утечки гипотония увеличивается с ростом отношения давлений. Перерезка обоих блуждающих нервов приводит к тому, что замедления сердечной деятельности при взрывной декомпрессии не наблюдается, а падение кровяного давления несколько уменьшается. Эти авторы, кроме того, констатировали значительное, но кратковременное увеличение давления спинномозговой жидкости при коэффициентах утечки, боль-

исследований подтвердили ранее полученные данные и в совокупности с ними показали, что при такой высоте взрывная декомпрессия, которая сама по себе не является смертельной, может представлять серьезную опасность, если будет сопровождаться развитием острого кислородного голодания.

Кроме того, опыты в Эйльской лаборатории на обезьяне, проведенные с коэффициентом утечки $1/87 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и отношением давлений, достигающим до 10 ($6000/21000 \text{ м}$), дали важные дополнительные материалы о действии взрывной декомпрессии на сердечно-сосудистую систему, внутрибрюшное давление и среднее ухо.

Так, Желфан и Вернер [37, 38], подтверждая понижение артериального давления, описанное Хитчкоком, показали, что этому постоянно предшествовало кратковременное повышение артериального давления, которое продолжалось и после атропинизации, или перерезки блуждающего нерва.

Это важное наблюдение дополняет и удачно объясняет рефлекторные урежения пульса и гипотонию, отмеченные Хитчкоком [85], у которого ртутный манометр с самописцем имел слишком большую инерцию, чтобы зарегистрировать изменение давления, происходящее почти мгновенно.

Желфан [34] предложил также исследование состояния давления — объем газов, содержащихся в брюшной полости, на начальной и конечной высоте. Исследование этого состояния позволяет получить представление о законах, которым подчиняется расширение газов, содержащихся в замкнутых полостях, при взрывной декомпрессии. Результат был не в пользу теоретической формулы, предложенной Свинеем и Гэге [32].

Наконец, Чэнг, Маргариа и Желфан [11] показали, что кровоизлияние сзади барабанной перепонки, отмеченное Бержере [5] при взрывной декомпрессии и подтвержденное Смитом [67], Иви [53] и многими другими [14, 15, 41], является следствием быстрой рекомпрессии, т. е. быстрого повышения давления при спуске с конечной высоты до земли. Они считают, кроме того, что взрывная декомпрессия не оказывает воздействия на среднее ухо, но это их мнение требует более детального обсуждения.

Итак, американские экспериментальные исследования показали, что хотя общая устойчивость живых существ при взрывной декомпрессии со значительными коэффициентом утечки и отношением давлений хорошая, однако повреждения в виде наблюдаемых под микроскопом кровоизлияний

ние конечного объема газов (после приведения его к 37° и состоянию насыщения водяным паром) к начальному объему. Уже в работах Свиней и Иоффе [69, 70] авторы на основании экспериментальных данных стремились найти уравнение, связывающее величину газового расширения и время декомпрессии, исключающих возможность возникновения каких-либо повреждений в организме. Они пришли к выводу, что, когда время декомпрессии t увеличивается, предельное расширение газов E , определяемое по формуле (1), может быть выражено эмпирической формулой

$$E = 2,1 + 17t. \quad (2a)$$

Итак, по Гэге и Свиней [31] критерий безопасности

$$E \leq 2,1 + 17t. \quad (2б)$$

Более того, Гэге установил [30], что время декомпрессии герметической кабины может быть вычислено с достаточной точностью по следующей формуле:

$$t = \frac{1}{197} \cdot \frac{V}{S} \sqrt{\frac{p_k}{p_a} - 1}, \quad (3)$$

где $\frac{V}{S}$ — величина, обратная коэффициенту утечки кабины в $\text{м}^3/\text{м}^2$;

p_k — давление в кабине;

p_a — атмосферное давление на конечной высоте.

Давления p_k и p_a должны быть выражены в одних и тех же единицах. Если подставить в формулу (2б) значение t , найденное по формуле (3), то получим

$$E \leq 2,1 + 0,0862 \frac{V}{S} \sqrt{\frac{p_k}{p_a} - 1}. \quad (4)$$

Эта формула позволяет по двум из элементов E , $\frac{V}{S}$ и $\frac{p_k}{p_a}$ подсчитать третий элемент.

Но формула (4) была получена исходя из следующих предположений.

1. Повреждение легких носит характер разрыва легочной ткани, вызванного чрезмерным расширением.

2. Расширение легких следует за декомпрессией, т. е. грудная клетка продолжает расширяться без сопротивления и без опоздания.

3. Расширение газов, находящихся в закрытых полостях, подчиняется закону (1).

4. Отношение между предельным расширением и временем декомпрессии является линейным.

ного. Внутригрудное давление может быть передано таким образом датчику. Регистрация происходит в хороших условиях, так как треугольная грудная кость у собаки покрыта только относительно тонким слоем мышц.

*
* *

Итак, в этой главе мы описали применявшуюся нами для исследования взрывной декомпрессии технику, а именно:

1. Для получения взрывной декомпрессии мы использовали технику двойной камеры. Для регистрации кривых декомпрессии в функции времени мы применяли прибор Флёри, состоящий из датчика с переменной емкостью, измерителя емкости и катодного осциллографа — регистратора. Этот прибор, применяемый в промышленности, позволил нам регистрировать декомпрессии, происходящие в течение нескольких миллисекунд.

2. Изучение техники регистрации быстро меняющихся физиологических процессов показало, что основной проблемой является проблема датчика. Это привело нас к тому, что в качестве регистрирующего прибора был выбран также прибор Флёри, переделанный для физиологических исследований. Этот прибор позволил производить регистрацию процессов, происходящих за время менее $\frac{1}{100}$ сек.

3. Для обеспечения высокого качества регистрации физиологических процессов необходимо:

а) не допускать между датчиком, воспринимающим изменение давления, и манометром даже малейшего пузырька воздуха;

б) использовать соединительные трубки как можно меньшей длины и как можно большего внутреннего диаметра.

Глава III

ЗАКОН ДЕКОМПРЕССИИ В КАБИНЕ ПРИ ВЗРЫВНОЙ ДЕКОМПРЕССИИ

Во время взрывной декомпрессии внешнее по отношению к организму давление быстро снижается, достигая нового уровня. Плотные ткани и жидкие среды организма приходят в равновесие с новым давлением без значительного изменения их объема. Газы же, которые содержатся в замкнутых полостях (кишечник) или в органах, сообщающихся с внешней средой через малые (по отношению к объему органов) отверстия (легкие, среднее ухо), увеличиваются в объеме до тех пор, пока их давление не уравняется с новым внешним давлением.

Расширение газа, содержащегося в замкнутых полостях некоторых органов, всегда приводит к увеличению объема последних, сопровождаемому бóльшим или мёньшим повышением давления в зависимости от бóльших или мёньших возможностей растяжения стенок полостей, например брюшной полости в случае желудочно-кишечного тракта, как мы это увидим в дальнейшем.

Это не относится к органам, которые сообщаются с внешней средой (например, к легким). Расширение содержащихся в них газов может вызвать изменения внутри этих органов только в том случае, если давление в кабине падает быстрее, чем в самом органе.

Мы уже указали, что наиболее простой способ избежать опасного повышения внутрилегочного давления и связанной с ним опасности повреждения легких заключается в том, чтобы осуществить такие условия, при которых декомпрессия в кабине всегда будет более медленной, чем декомпрессия в легких.

Таким образом, оказалось необходимым изучить закон легочной декомпрессии и декомпрессии в кабине для по-

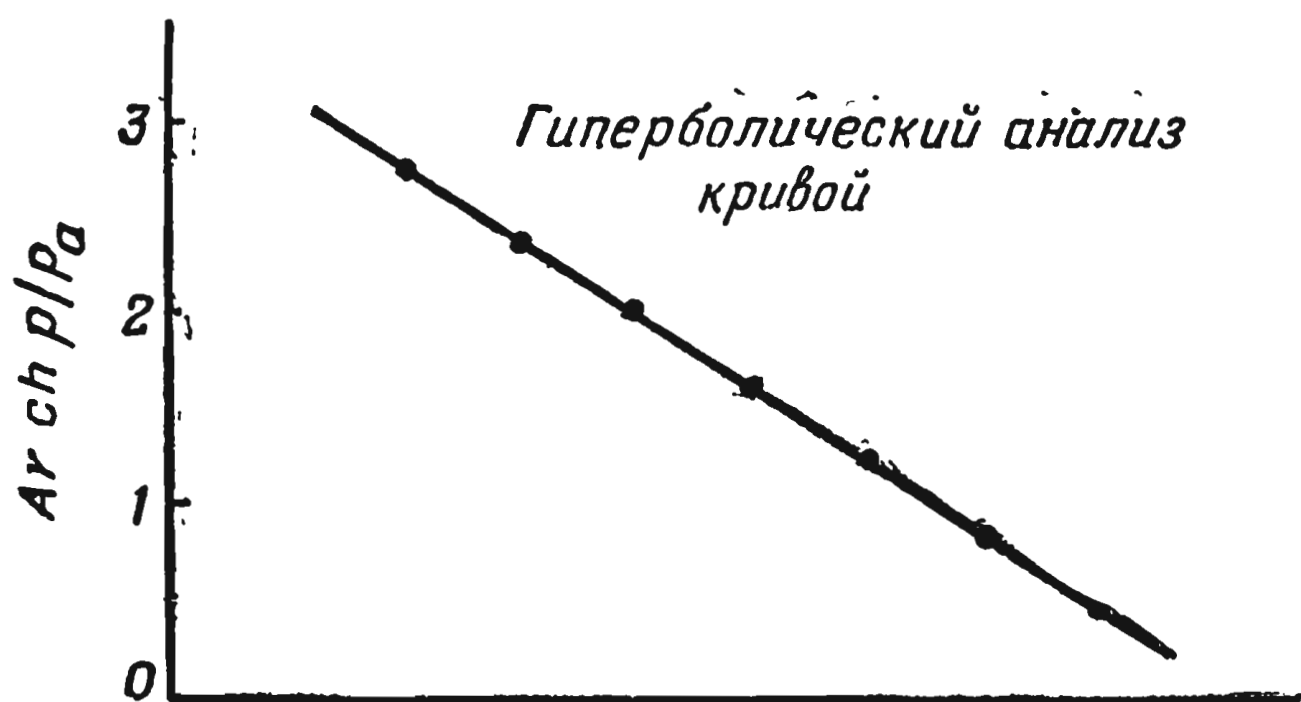
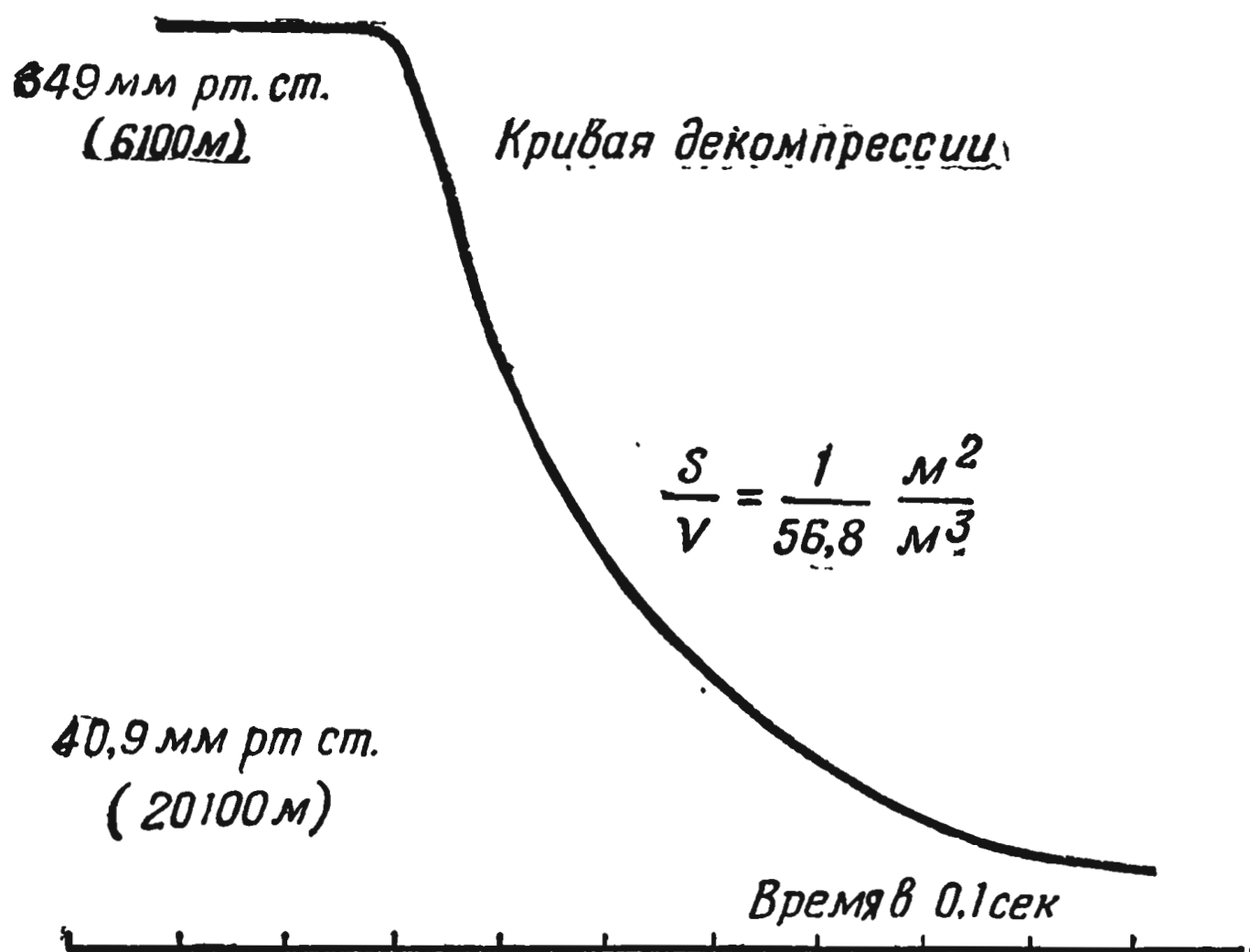


Рис. 2. Кривая декомпрессии в условиях взрывной декомпрессии (вверху), взятая из работы Жилеспи [39], и ее гиперболический анализ (внизу)
Начальная высота 6100 м (349 мм рт. ст.); конечная высота 20100 м (40,9 мм рт. ст.).

Видно, что зависимость $\text{Arch} \frac{p}{P_a}$ от времени представляет собой прямую линию

Плотность газа внутри кабины

Если обозначить отношение плотности газа ρ в кабине в каждый момент t к плотности газа ρ_a в конечных условиях через d , а средний показатель политропы расширения газа — через n , то, очевидно,

$$d = \frac{\rho}{\rho_a} = \left(\frac{p}{p_a} \right)^{\frac{1}{n}} = r^{\frac{1}{n}}. \quad (5a)$$

Отсюда мгновенное изменение относительной плотности газа

$$\frac{d(d)}{dt} = \frac{1}{n} r^{\frac{n-1}{n}} \frac{dr}{dt}. \quad (5b)$$

Плотность газа в кабине, следовательно, выражается формулой

$$\rho = \rho_a r^{\frac{1}{n}}, \quad (6a)$$

а ее изменение

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_a} r^{\frac{n-1}{n}} \frac{dr}{dt}. \quad (6b)$$

Таким же образом можно подсчитать относительные значения удельного объема и температуры. Итак, эмпирические уравнения (1a) и (1б) позволяют заранее рассчитать различные относительные параметры газа, содержащегося в кабине. Представляется интересным попытаться связать эти уравнения с формулами, которыми пользуются в термодинамике для расчетов истечения газов.

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ФОРМУЛ

Известная классическая формула истечения газа выражает изменение массы в кабине объемом V . Эта масса равна массе газа, которая проходит через отверстие утечки в течение того же времени dt и выражается уравнением

$$-Vd\rho = S\rho_0 v_0 dt = S\rho_a v_a dt \quad (7a)$$

или

$$-\frac{d\rho}{dt} = \frac{S}{V} \rho_0 v_0 = \frac{S}{V} \rho_a v_a, \quad (7b)$$

где ρ — плотность газа в кабине в каждый данный момент;

S — площадь отверстия утечки;

ρ_0 — плотность вытекающего газа при давлении p_0 в отверстии утечки;

v_0 — скорость истечения газа, разреженного до давления p_0 ;

v_a — скорость истечения газа при конечном давлении p_a ;

ρ_a — плотность газа при конечном давлении p_a .

Уравнение (76) представляет собой уравнение непрерывности, выражающее постоянство количества газа, проходящего через отверстие. Это уравнение связано с уравнением движения газа, дающим зависимость скорости истечения газа через отверстие от давления. Используя в качестве уравнения движения уравнение Бернулли, мы можем подсчитать скорость v_0 газа, расширяющегося от давления p до давления p_0 . Логично допустить, что, проходя через отверстие, газ расширяется до давления p_a и что это можно выразить следующим уравнением:

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{S}{V} \rho_a v_a.$$

Подставив в это уравнение значение скорости v_a , определенное из уравнения Бернулли, получим

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{S}{V} \rho_a \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} \cdot \sqrt{\frac{2n}{n-1} \left(r^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)}. \quad (8)$$

Эта формула отражает следующие условия: во время истечения газа в атмосферу при постоянном внешнем давлении p_a и при непрерывном уменьшении r до 1 количество проходящего через отверстие газа сначала растет, достигает максимума, а затем уменьшается. Точно так же при постоянном давлении в кабине p_k и при конечном давлении, постоянно уменьшающемся, начиная с p_k , количество проходящего через отверстие газа вначале увеличивается, доходит до максимума, а затем уменьшается до нуля. Но, как показал Сен-Венан в 1839 г. [6], такие условия истечения противоречат практическим наблюдениям.

Если непрерывно уменьшать конечное давление, оставляя давление в кабине постоянным, количество вытекающего газа растет, достигает максимума и затем остается довольно постоянным. Таким образом, приходим к следующему заключению: если при определенном давлении в ка-

бине p_k непрерывно уменьшать конечное давление p_a , то давление газа p_0 в месте утечки сначала уменьшается с p_k до некоторого критического значения (соответственно r уменьшается до $r_{кр}$), после чего оно зависит только от давления в кабине и по величине все время превышает давление p_a . Количество проходящего через отверстие газа после некоторого непрерывного увеличения остается максимальным и равным тому, которое наблюдалось при $r_{кр}$.

Применяя эти результаты к истечению газа из кабины в атмосферу при постоянном давлении в кабине p_k , необходимо ясно различать следующие два случая:

1) если давление в кабине выше критического, давление в отверстии p_0 зависит только от давления в кабине;

2) если давление в кабине ниже критического, давление в отверстии равно p_a и уравнение (8) применимо.

Как показывает расчет по формулам термодинамики, для достижения максимального истечения газа через отверстие необходимо, чтобы критическое отношение давлений $r_{кр} = \frac{p}{p_0}$ было

$$r_{кр} = \left(\frac{n+1}{2} \right)^{\frac{n}{n-1}}. \quad (9)$$

Эта формула позволяет подсчитать критическое давление в кабине

$$p_{кр} = p_a r_{кр}$$

и разделить истечение газа на две фазы: сверхзвуковую (когда $p > p_{кр}$) и дозвуковую (когда $p < p_{кр}$).

Сверхзвуковая фаза ($p > p_{кр}$). Термодинамика показывает, что при этой фазе скорость v_0 истечения газа через отверстие в каждый момент времени равна скорости звука при условиях в отверстии p_0 и ρ_0 .

Тогда имеем

$$p_0 = \frac{p}{r_{кр}}$$

и

$$-\frac{dp}{dt} = \rho_a r^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{S}{V} \sqrt{n \frac{p_a}{\rho_a}} r^{\frac{n-1}{2n}} \left(\frac{n+1}{2} \right)^{\frac{n+1}{2(n-1)}}. \quad (10)$$

Дозвуковая фаза ($p < p_{кр}$). При этой фазе $p_0 = p_a$. Тогда, применяя формулу Бернулли, получаем

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{S}{V} \rho_a \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} \cdot \sqrt{\frac{2n}{n-1} \left(r^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)}. \quad (8)$$

Таким образом, можно легко сравнить уравнения (8) и (10) с уравнением (6б). Но более интересно сначала преобразовать уравнения (8) и (10) и сравнить их с уравнением (3б).

Известно, что при адиабатном * расширении газа, характеризующемся показателем политропы n , в каждый данный момент на основе закона Лапласа можно написать

$$\frac{dp}{dt} = n \frac{p}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} = n \frac{p_a}{\rho_a} r^{\frac{n-1}{n}}. \quad (11)$$

Отсюда сразу можно получить:

1. Для сверхзвуковой фазы ($p > p_{кр}$)

$$\frac{dp}{dt} = p_a r \frac{S}{V} \sqrt{n \frac{p_a}{\rho_a} r^{\frac{n-1}{2n}}} n \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{2(n-1)}}. \quad (12)$$

2. Для дозвуковой фазы ($p < p_{кр}$)

$$\frac{dp}{dt} = p_a r \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a} r^{-\frac{1}{n}}} \sqrt{r^{\frac{n-1}{n}} - 1}. \quad (13)$$

Если мы теперь сравним эти уравнения с уравнением (3б), написанным в следующей, более удобной форме:

$$\frac{dp}{dt} = p_a \sqrt{r^2 - 1} K, \quad (3б)$$

то увидим, что уравнение (13) не приводится к уравнению (3б); напротив, уравнение (12) может быть достаточно точно приведено к уравнению (3б), если только выполняются условия, что $r > 2$ и

$$K = \frac{S}{V} \sqrt{n \frac{p_a}{\rho_a}} n \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{2(n-1)}} r^{\frac{n-1}{2n}}. \quad (14)$$

Все члены уравнения (14) в условиях нашего опыта постоянны, за исключением величины $r^{\frac{n-1}{2n}}$, которая незначительно меняется. Следовательно, уравнение (12) будет точ-

* Адиабатное расширение газа — расширение, при котором теплообмен между расширяющимся газом и внешней средой отсутствует. Такое расширение характеризуется показателем адиабаты κ . Автор же здесь и в дальнейшем, вместо этого показателя, применяет показатель политропы n . Хотя по величине эти показатели отличаются друг от друга незначительно, а в случае идеального газа равны, это — два различных показателя. — Прим. ред.

ным в том случае, если величина коэффициента K при постоянном K' в каждый данный момент равна

$$K = \frac{S}{V} \sqrt[n]{\frac{p_a}{\rho_a} r^{\frac{n-1}{2n}}} \cdot K'. \tag{15}$$

Иными словами, величина этого коэффициента должна быть производной от коэффициента утечки $F = \frac{S}{V}$ при звуковой скорости и при условиях в кабине p и ρ [данные уравнений (1) и (6)]. Но такое предположение можно подтвердить только точными экспериментами, в связи с чем мы и провели в своих опытах изучение коэффициента K .

СВОЙСТВА КОЭФФИЦИЕНТА K
Изучение коэффициента K

Приведенный нами гиперболический анализ 25 записей декомпрессий показывает постоянство коэффициента K во время данной декомпрессии до значений отношения давления, очень близких к единице (см. рис. 1 и 2). Изменяя значения $\text{Ar sh } r$ в зависимости от времени, можно достаточно легко менять этот коэффициент.

Этим путем мы получили таблицу значений коэффициента K для различных коэффициентов утечки (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Значения коэффициентов декомпрессии K для математически проанализированных кривых

Номер опыта	$R = \frac{p_k}{p_a}$	Начальная высота, км	Конечная высота, км	Коэффициент утечки, м ² /м ³	Коэффициент декомпрессии
1	1,445	0	3	1/2,77	94
2	То же	То же	То же	То же	94
3	1,607	12	15	"	83
4	1,837	8	12	"	92
5	2,150	0	6	"	86
6	То же	То же	То же	"	87
7	2,286	3	9	"	87
8	2,555	9	15	"	86
9	То же	То же	То же	"	88
10	"	"	"	"	77
11	"	"	"	"	76
12	"	"	"	"	80
13	"	"	"	"	80
14	"	"	"	"	78

Номер опыта	$R = \frac{p_k}{p_a}$	Начальная высота, км	Конечная высота, км	Коэффициент утечки, $\text{м}^2/\text{м}^3$	Коэффициент декомпрессии
15	2,952	8	15	1/2,77	83
16	3,304	0	9	То же	84
17	4,144	9	18	"	84
18	4,190	12	21	"	80
19	5,842	3	15	"	76
20	6,710	9	21	"	81
21	1,445	0	3	1/7,34	34
22	1,550	9	12	То же	34
23	2,555	9	15	"	32
24	То же	9	15	"	32
25	8,533	6,1	20,1	1/56,8	4

Из этой таблицы видно, что коэффициент K , весьма постоянный во время данной декомпрессии для каждой группы опытов, пропорционален коэффициенту утечки F .

Можно полагать, что постоянство коэффициента K в течение каждой данной декомпрессии связано с величиной показателя политропы n , близкой к единице. В дальнейшем мы увидим, что в случае расширения газов, содержащихся во внутренних полостях организма и насыщенных водяными парами при 37°C , показатель политропы n равен приблизительно 1,1 и может быть отождествлен с показателем изотермы $n=1$. Но в случае декомпрессии в кабине при температуре воздуха $+15^\circ \text{C}$ и 70% влажности показатель политропы, подсчитанный по общеизвестным формулам, составляет 1,29, что практически нельзя принять за единицу. Вследствие этого экспериментальное значение коэффициента K не может полностью совпадать со значением, вычисленным по уравнению (15), хотя достаточно приближается к нему; уравнение (12) не может быть точно отождествлено с уравнением (3б) в связи с постоянством коэффициента K во время данной декомпрессии.

Итак можно полагать, что коэффициент K , связанный со скоростью декомпрессии коэффициентом утечки, как это показывают уравнения, должен выражаться формулой

$$K = \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} \cdot K_c, \quad (16)$$

где K_c — экспериментальный безразмерный коэффициент, имеющий значение коэффициента сжатия струи.

постоянным во время данной декомпрессии и пропорционален отношению $\frac{p_a}{\rho_a}$ [уравнения (18) и (19)].

Поэтому можно заключить, что в отверстии газ находится при конечной температуре, и допустить изотермный характер расширения на этом уровне.

Следовательно, в плоскости отверстия применимо уравнение (6а), т. е. $\rho = \rho_a r^{\frac{1}{n}}$, или проще

$$\rho = \rho_a r \quad (21a)$$

и

$$\frac{d\rho}{dr} = \rho_a \frac{dr}{dr} \quad (21б)$$

Это приводит к предположению, что расширение газа около отверстия происходит очень быстро, причем в этом месте преобладает конечная температура, до которой охлаждается расширяющийся газ.

Таким образом, опыты показали, что все протекает так, как если бы расширение газа в плоскости отверстия происходило изотермно при конечной температуре. Этот результат приводит нас к использованию теоретических уравнений истечения газа в расчете на подтверждение экспериментальными данными.

Вывод уравнения истечения газа из отверстия

Уравнение (20), составленное на основе экспериментальных исследований, представляет собой уравнение истечения газа, отличное от уравнения (8), и требует еще подтверждения опытом.

Подсчитаем среднюю скорость $v_{ср}$, достигнутую газом с плотностью $\rho_{ср}$ (промежуточной между плотностью внутри кабины перед отверстием $\rho_a r$ и плотностью за отверстием снаружи ρ_a) под действием падения давления $p_k - p_a$, происходящего в отверстии.

Очевидно,

$$\frac{\rho_{ср} v_{ср}^2}{2} = p_k - p_a \quad (22)$$

Но если расширение, имеющее изотермный характер, происходит на коротком отрезке пути, можно предположить, что $\rho_{ср}$ представляет собой среднее арифметическое между $\rho_a r$ и ρ_a

$$\rho_{ср} = \rho_a \left(\frac{r + 1}{2} \right) \quad (23)$$

положениям. Поэтому сначала эти законы необходимо изучить, а затем рассмотреть легочную декомпрессию на экспериментальной и теоретической основах.

*
* *
*

В этой главе мы изучили закон декомпрессии в кабине при взрывных декомпрессиях, а именно:

1. Нами было показано, что изменение давления в кабине выражается не линейной функцией времени, как это описали некоторые авторы, а эмпирическим отношением:

$$p = p_a \operatorname{ch} K(t_0 - t), \quad (1)$$

где t_0 — время декомпрессии в кабине;

p — давление в кабине в каждый данный момент времени t ;

p_a — конечное давление;

K — экспериментальный коэффициент, значение которого будет показано ниже.

Мы вывели этот закон, математически анализируя 24 собственные записи и запись, полученную в Лаборатории авиационной медицины США. Из этого отношения были выведены все производные, которые необходимы для алгебраического анализа.

2. Сравнения дифференциального уравнения истечения, выведенного из результатов наших опытов, с известными теоретическими уравнениями позволяют нам показать, что уравнение прохождения газа через отверстие не может быть уравнением Бернулли. Уравнение Югоньо для случая сверхзвукового истечения более близко к нашим результатам, но требует непрерывного изменения коэффициента K во время декомпрессии.

3. Мы показали, что коэффициент K был, напротив, весьма постоянным во время декомпрессии и удовлетворяет формуле

$$K = \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} K_c, \quad (2a)$$

где $\frac{S}{V}$ — коэффициент утечки (отношение площади S отверстия истечения к объему V кабины);

ρ_a — плотность газа при конечных условиях;

K_c — безразмерный коэффициент, соответствующий коэффициенту сжатия газов в отверстии и равный в наших опытах $0,9 \pm 0,02$.

4. Мы показали, что постоянство коэффициента K во время данной декомпрессии и ее пропорциональность величине $\sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}}$ означают, что истечение газа из отверстия проходит так, как если бы расширение газа происходило изотермно и при конечной температуре расширения. Это следствие приводит к уравнению импульсного истечения, позволяющему вывести уравнение (1) из принципов термодинамики.

5. Продолжительность декомпрессии, которую мы достигли, равна

$$t_0 = \frac{V}{S} \sqrt{\frac{\rho_a}{p_a}} \cdot \frac{1}{K_c} \operatorname{Ar} \operatorname{ch} R,$$

где R — отношение начального давления к конечному давлению.

Сравнение этой формулы с формулой Югоньо показывает, что последняя практически не нужна. Эмпирическая формула Гэге дает достаточный порядок величин и более точные результаты, но степень ее точности зависит в основном от показателя политропы расширяющегося газа.

Если обозначить начальное давление p_k , конечное давление p_a , начальный объем $V_{\text{нач}}$, конечный объем $V_{\text{кон}}$ и учесть, что давление насыщенного водяного пара при 37° равно 47 мм рт. ст., то, используя закон Мариотта*, можно написать следующее отношение между $V_{\text{нач}}$, $V_{\text{кон}}$ и давлением сухих газов $p_k - 47$ (начальное) и $p_a - 47$ (конечное):

$$(p_k - 47) V_{\text{нач}} = (p_a - 47) V_{\text{кон}}, \quad (1a)$$

откуда

$$E = \frac{V_{\text{кон}}}{V_{\text{нач}}} = \frac{p_k - 47}{p_a - 47}. \quad (16)$$

Но эта формула противоречит экспериментам, ибо в соответствии с ней при взрывной декомпрессии с наивысшей конечной высотой 19 000 м, где $p_a = 47$ мм рт. ст., происходило бы мгновенное беспредельное расширение, связанное с закипанием воды, что не наблюдалось в опыте и представляет физически бессмыслицу. Кроме того, в исследованиях Желфана [34] состояние (давление $\times$ объем) газов, содержащихся в брюшной полости, во время взрывной декомпрессии находилось в соответствии не с формулой (1a), а с эмпирической приближенной формулой

$$E = \frac{p_k}{p_a}. \quad (2)$$

Итак, формулы (1a) и (16), полностью обоснованные в случае медленной декомпрессии, не могут применяться к взрывной декомпрессии.

Гипотеза постоянства насыщения также не соответствует действительности, ибо при быстром расширении смеси, содержащей компонент, способный к конденсации, происходит частичная конденсация указанного компонента смеси.

Взрывная декомпрессия замкнутой полости может привести только к внутреннему изотермному расширению, которое при декомпрессии от p_k до p_a равно по закону Мариотта $\frac{p_k}{p_a}$. Итак, очевидно, что значение E , данное уравнением (16), всегда выше значения $\frac{p_k}{p_a}$, что физически не-

* В советской литературе этот закон постоянства произведения давления газа на объем ($pV = \text{const}$) известен как закон Бойля-Мариотта.— Прим. ред.

жили для каждого из этих расширений следующие одинаковые и для альвеолярных газов, и для газов, заключенных в замкнутых полостях внутренних органов, начальные условия:

- 1) давление углекислого газа равно 40 мм рт. ст.;
- 2) давление насыщенного пара при 37° равно 47 мм рт. ст.

Таким образом, мы получили зависимость давления неконденсирующейся части газа от температуры. Прибавляя к этим давлениям для каждой температуры величину давления насыщенного пара, мы нашли общее давление

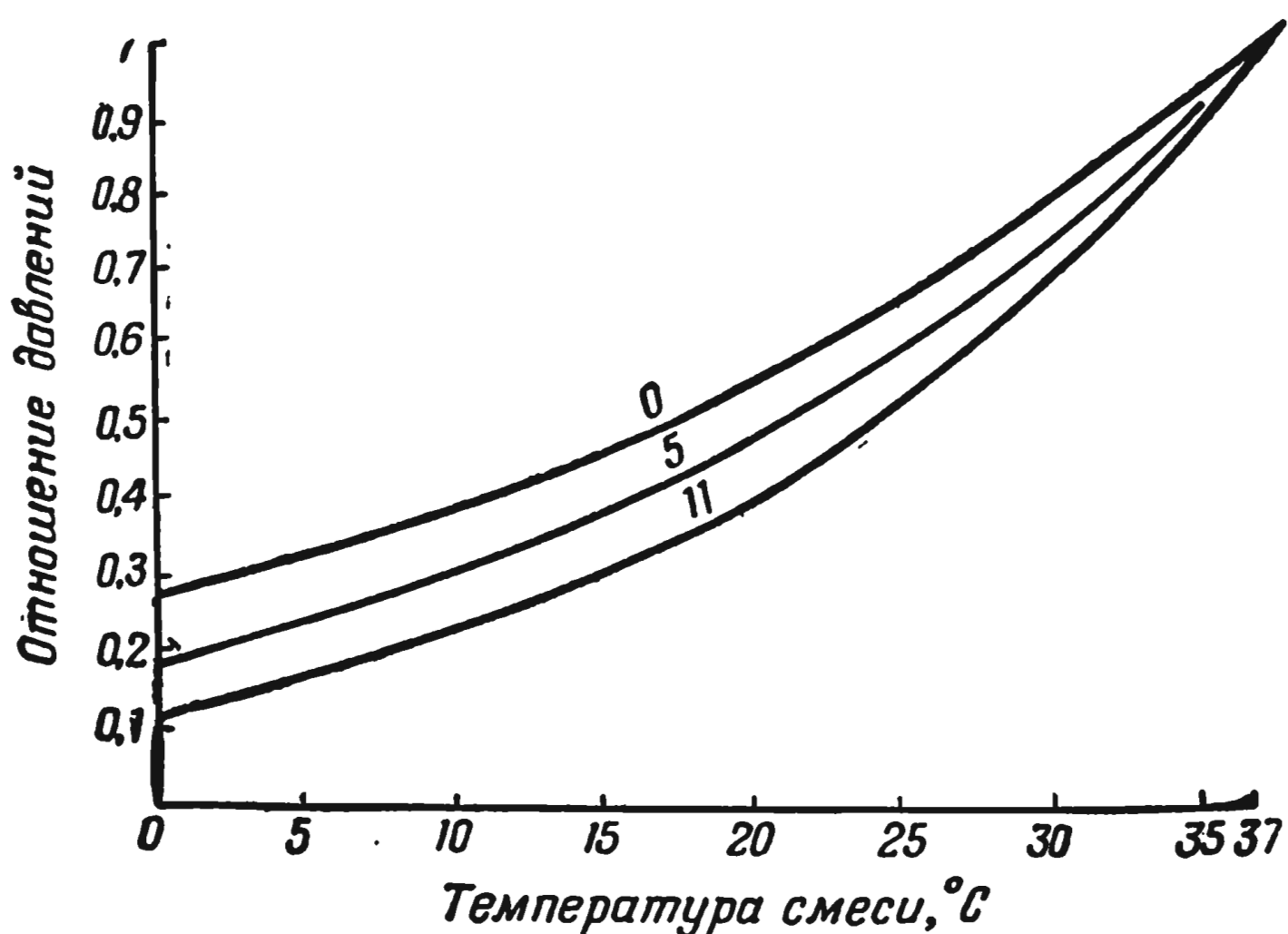


Рис. 3. Графики зависимости отношения давлений от температуры, рассчитанные по формуле Гульдберга и Моэна

Показаны кривые для начальных высот 0 м (кривая 0), 5000 м (кривая 5) и 11 000 м (кривая 11). Зная отношение $\frac{P_a}{P_k}$, можно сразу найти соответствующую температуру смеси, и наоборот

газа при любой температуре. Далее, мы превратили абсолютные давления в относительные и построили таблицу и графики зависимости относительного общего давления смеси из газа и пара от температуры (табл. 4, рис. 3).

Т а б л и ц а 4

Зависимость относительного общего давления (газ + пар) от температуры влажного газа, находящегося в альвеолах и расширяющегося адиабатно, при начальных высотах от 0 до 11 000 м, подсчитанная при помощи формулы (4)

Начальная высота, км	Температура, °С								
	37	35	30	25	20	15	10	5	0
0	1	0,934	0,784	0,660	0,554	0,467	0,393	0,335	0,282
1	1	0,930	0,777	0,648	0,538	0,448	0,374	0,314	0,262
2	1	0,926	0,767	0,634	0,523	0,430	0,354	0,295	0,242
3	1	0,923	0,759	0,623	0,507	0,415	0,338	0,276	0,224
4	1	0,921	0,751	0,610	0,494	0,398	0,320	0,258	0,206
5	1	0,919	0,743	0,599	0,480	0,382	0,304	0,243	0,190
6	1	0,917	0,736	0,588	0,466	0,367	0,288	0,228	0,174
7	1	0,915	0,729	0,578	0,453	0,354	0,275	0,214	0,160
8	1	0,912	0,722	0,567	0,441	0,342	0,262	0,202	0,150
9	1	0,909	0,715	0,557	0,430	0,330	0,251	0,191	0,141
10	1	0,907	0,709	0,550	0,420	0,320	0,241	0,182	0,133
11	1	0,905	0,703	0,541	0,409	0,308	0,230	0,172	0,124

Изучение таблицы и графиков показывает, в частности, что для получения одного и того же снижения температуры газов организма при различных начальных высотах при начальной высоте 11 000 м необходима более значительная декомпрессия, чем при начальной высоте 0 м.

Пользуясь таблицей зависимости давлений неконденсирующейся части от температуры, можно с помощью закона Мариотта подсчитать молекулярный объем, соответствующий данной температуре и данному давлению:

$$pV = RT, \quad (5a)$$

откуда

$$V = \frac{RT}{p}. \quad (5б)$$

Абсолютные объемы V легко превратить в относительные путем сравнения с молекулярным объемом, который в условиях любой температуры и любой начальной высоты берется одинаковым.

Так нами получена табл. 5 зависимости относительного

