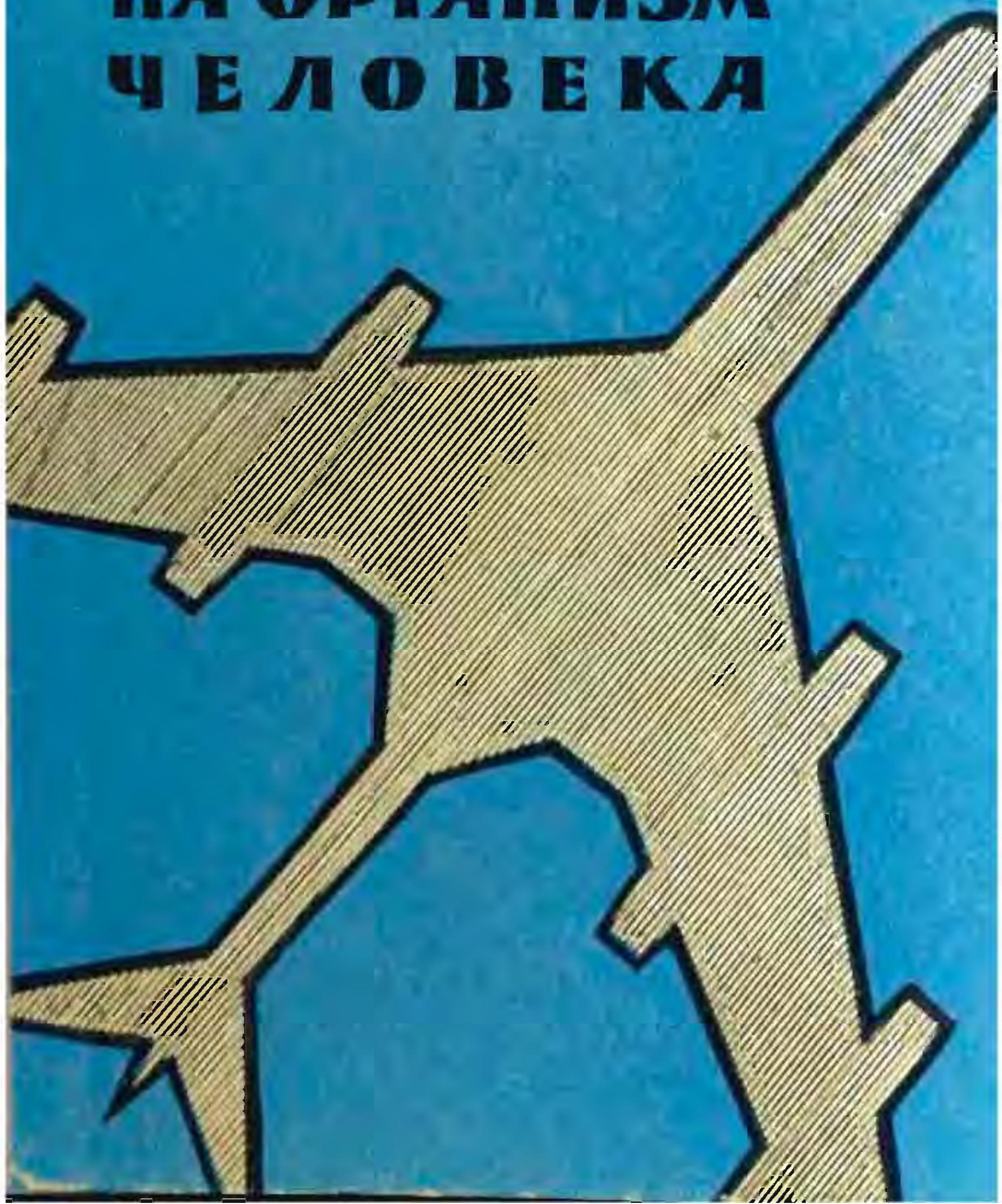


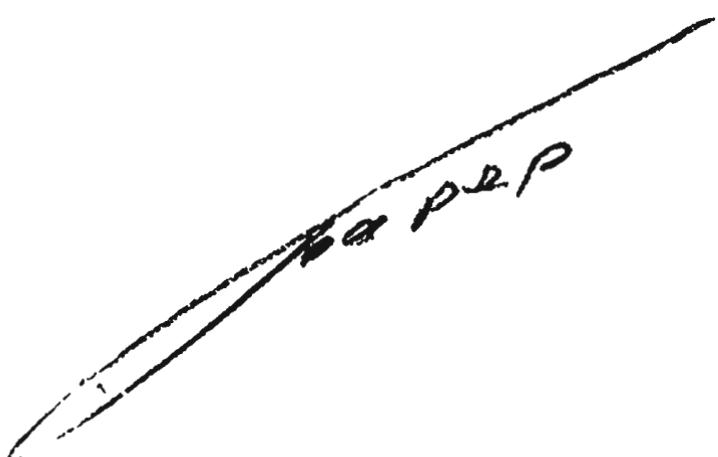
франсуа виолетт

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



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 искушенным в математике читателем. Предложение автора характеризовать декомпрессию по величине отношения начального давления к конечному ( $R = \frac{p_{\text{нач}}}{p_{\text{кон}}}$ ) 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 позволяют инженерам рассчитывать и конструктировать 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, исчерзывающей 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 исчерзывающую 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 предпошлем историческую справку и изложение особенностей применявшимся 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 м<sup>3</sup> через отверстие в 14 мм<sup>2</sup>, 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 позволяют 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  $8/10000$  до  $5/1000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Исследования Армстронга с участием человека были выполнены при коэффициенте утечки  $1/3,9 \text{ м}^2/\text{м}^3$  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  $1/10 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , 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  $1/70 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , который может рассматриваться как предел переносимости. В других опытах с коэффициентом утечки  $1/6,25 \text{ м}^2/\text{м}^3$  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. Структура 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 Гэгэ и Свинея.

### **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 13 500 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,

Таблица 1

**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  $1/_{48} \text{ м}^2/\text{м}^3$  и отношения давлений от 6 до 3,7 соответственно разности высот  $3000/_{15000}$  и  $3000/_{12000} \text{ м}$ . 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-

ших или равных  $1/12 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Непродолжительность этого явления показывает несостоятельность гипотезы о повышении давления в результате выделения пузырьков газа внутри спинномозговой жидкости.

Повреждения в виде кровоизлияний в легких и под твердой мозговой оболочкой, понижение артериального давления и урежение пульса, а также повышение давления спинномозговой жидкости Хитчкок объяснял прямым действием или действием отраженной волны резко повышенного внутригрудного давления и передачей его внутрь черепной полости. Если это объяснение кажется правдоподобным для повреждений твердой мозговой оболочки и для повышения давления спинномозговой жидкости, то плохо понятен механизм образования повреждений в виде кровоизлияний в легких, встречающихся при повышенном давлении, передающемся одинаково во все стороны внутри закрытой полости легких. Точно так же остается неясным механизм понижения кровяного давления и рефлекторного урежения пульса. Выяснить эти механизмы можно было только при систематическом использовании электрической регистрации, подобной той, которую применяли Желфан и Вернер [37, 38] в 1951 г. Она является более точной и более надежной, так как позволяет регистрировать мгновенное и быстро проходящее повышение давления, которое методами, использовавшимися Хитчкоком, не могло быть зарегистрировано.

Серия аналогичных исследований была проведена, начиная с 1943 г., в университете Нортвестерн под руководством Иви [53]. Целью их было изучение общей устойчивости различных животных, наличия повреждений, вызванных взрывной декомпрессией, и механизма их образования. Эти исследования лишь подтвердили экспериментальные результаты, полученные в Лаборатории авиационной медицины и Колумбийской лаборатории, и не принесли никаких новых данных о механизме повреждений.

Исследования действия взрывной декомпрессии, проведенные до 1945 г., были выполнены на высотах, не превышающих 15 000 м. Эта последняя высота казалась в свое время максимальной высотой полета. Но развитие авиационной техники потребовало проведения новых исследований с максимальной высотой, доходящей до 24 000 м, которые проводились с 1946 г. в Эйльской [11, 19, 22, 34—38, 82], Колумбийской [7—10, 14, 15, 49—51, 54—56, 71, 72, 84] и Шарлотсвильской [16—18] лабораториях. Результаты этих

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, доходящим до 10 ( $6000/21000 \text{ м}$ ), дали важные дополнительные материалы о действии взрывной декомпрессии на сердечно-сосудистую систему, внутрибрюшное давление и среднее ухо.

Так, Желфен 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.

Желфен [34] предложил также исследование состояния давление — 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 Свиреем и Гэге [32].

Наконец, Чэнг, Маргариа и Желфен [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 наблюдавшихся под микроскопом кровоизлияний

в легких и в твердой мозговой оболочке, сопровождающиеся повышением артериального давления и давления спинномозговой жидкости, достаточно убедительно говорят о том, что устойчивость некоторых органов более ограничена. Повреждения твердой мозговой оболочки и физиологические изменения, по-видимому, можно объяснить значительным и быстрым повышением внутригрудного давления на основании теории Хитчкока [47], однако, несмотря на совпадение экспериментальных данных, необходимо предпочтать концепции Армстронга и Бенке. Только механизм повреждения в легких не поддается еще объяснению.

Предельный коэффициент утечки для отношения давлений ниже 6 начиная с 1943 г., казалось, может быть установлен приблизительно равным  $1/50 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Учитывая видимые глазом (макроскопические) повреждения органов и заметные изменения физиологических функций, мы считаем предельный коэффициент утечки аналогичным коэффициенту  $1/41 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , который рассматривается немецкими исследователями как безопасный для человека. Однако отсутствие макроскопических повреждений не позволяет еще отрицать возможности появления микроскопических повреждений при коэффициенте утечки ниже  $1/50 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Действительно, исследования Желфана [34, 38] с использованием более чувствительной техники регистрации показали наличие физиологических изменений, отмечаемых при коэффициенте утечки, равном  $1/87 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , и отношении давлений около 10. Тем не менее начиная с 1943 г. эксперименты на животных, определившие границы устойчивости живого организма, позволили с достаточной безопасностью перейти к экспериментальным исследованиям с участием человека.

## Б. Экспериментальные исследования с участием человека

В начале 1942 г. Смит провел исследование с участием человека при отношении давлений, равном 3,7 ( $3000/12000 \text{ м}$ ), и с коэффициентом декомпрессии  $1/65 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Исследование закончилось благополучно. Переносимость человеком быстрой декомпрессии оказалась вполне удовлетворительной. Однако необходимы были дальнейшие исследования с участием человека, которые и начали проводиться с 1943 г. в Лаборатории авиационной медицины и в Колумбийской лаборатории.

Физиологи Колумбийской лаборатории [21, 47, 52] проводили изучение как непосредственного действия мгновенной декомпрессии на организм человека, так и ее вторичного влияния, обусловленного аэроэмболизмом. Они использовали коэффициенты утечки  $1/43$ ,  $1/305$  и  $1/1220 \text{ м}^2/\text{м}^3$  при отношениях давлений от 2,3 до 3,2.

В этих условиях не наблюдалось никаких несчастных случаев. Испытуемые ощущали только чувство глубокого вдоха и прохождение воздуха через дыхательные пути. Это сопровождалось ощущением растяжения стенки живота без особенной боли. Можно было еще опасаться возможности появления случаев быстро развивающегося аэроэмболизма. Серия опытов, выполненных в условиях, аналогичных предшествующим, показала, что эти опасения были излишни.

Свиней и его сотрудники [69, 70] предложили исследовать в Лаборатории авиационной медицины, является ли разница давлений  $p_k - p_a$  между кабиной проектируемого самолета и атмосферой, переносимой для человека в случае взрывной декомпрессии.

Было изучено два случая:

1) случай для истребителя: предусмотренная разница давлений 142 мм рт. ст., коэффициент утечки  $1/3,4 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , при высоте полета 15 000 м высота в кабине 9000 м (отношение давлений 2,6), т. е. условия для пилота соответствуют высоте ниже той, на которой возможно возникновение аэроэмболизма \*;

2) случай для бомбардировщика: предусмотренная разница давлений 338 мм рт. ст., коэффициент утечки  $1/62 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , при высоте полета 10 500 м высота в кабине 3000 м (отношение давлений 2,9), т. е. возможен полет без пользования кислородной маской.

Чтобы изучить случай для истребителя, Свиней применил в качестве малой камеры скафандр с внутренним объемом 85 л, используя, таким образом, защитную одежду. Отверстие декомпрессии «кабины», расположенное на уровне груди, было круглой формы и меняющейся площади. Чтобы достигнуть коэффициента значительно ниже  $1/3,4 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , Свиней выбрал для первоначального исследования отверстие в  $0,00785 \text{ м}^2$ , думая получить таким образом

---

\* Здесь автор под аэроэмболизмом, очевидно, подразумевает декомпрессионные явления, связанные с образованием в крови или тканях пузырьков азота. Однако автор допускает неточность: указанные явления могут наблюдаться с высоты около 7000 м.— Прим. ред.

коэффициент утечки  $0,00785/0,085$ , или  $1/9,2 \text{ м}^2/\text{м}^3$ \*. Декомпрессия, вызванная в этих условиях разницей давлений 142 мм рт. ст. при конечной высоте 13 500 м (высота в кабине 8250 м, отношение давлений 2,3), показала, что, судя по физиологическим изменениям, был достигнут предел переносимости для человека. Таким образом, по-видимому, разница давлений в 142 мм рт. ст. при коэффициенте утечки  $1/3,4 \text{ м}^2/\text{м}^3$  и при высоте полета 15 000 м не могла быть применена без опасности для жизни в случае взрывной декомпрессии.

Чтобы исследовать случай для бомбардировщика, скафандр, недостаточно прочный для разницы давлений в 338 мм рт. ст., был заменен настоящей кабиной объемом 1,25 м<sup>3</sup>. Свинец показал, что декомпрессия с коэффициентом утечки  $1/17,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$  и отношением давлений 2,9 и 3,2 при максимальной высоте 10 500 м хорошо переносима. Для такой высоты указанные условия соответствовали разнице давлений в 338 и 388 мм рт. ст. и высоте кабины 3000 и 2400 м.

Итак, в противоположность случаю для истребителя условия повышенного давления, создаваемые в кабине бомбардировщика, не представляют никакой опасности в случае взрывной декомпрессии.

Изложенные результаты показывают, что если при конечной высоте 10 500 м и коэффициенте утечки  $1/17,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$  разница давлений в 388 мм рт. ст. хорошо переносима, то при высоте 13 500 м и коэффициенте  $1/9,2 \text{ м}^2/\text{м}^3$  разница давлений в 142 мм рт. ст. является пределом переносимости для человека. Этот предел разницы давлений при данном коэффициенте утечки быстро уменьшается с увеличением высоты. Одновременно относительное расширение  $E$  газов, находящихся в замкнутой полости (представленное отношением  $\frac{V_{\text{кон}}}{V_{\text{нач}}}$ , где конечный объем газов приведен к 37° С и состоянию полного насыщения водяного пара), очень быстро растет с увеличением высоты. Следовательно, предел переносимой разницы давлений и относительное расширение газов замкнутых полостей могут быть связаны уравнением.

---

\* Автором допущена математическая неточность:  $\frac{0,00785}{0,085} = \frac{1}{10,82}$ , или 0,092. В дальнейшем автор несколько раз ссылается на этот неточный коэффициент  $1/9,2$ . — Прим. ред.

На основании приведенных экспериментальных данных и теоретических расчетов, которые мы изложим ниже, Свиней и Гэге [30, 32] установили эмпирическое отношение, позволяющее определить до высоты 15 000 м максимальную переносимую разницу давлений в зависимости от коэффициента утечки и конечной высоты. Приложение этой формулы к случаю самолета-истребителя (коэффициент утечки  $1/_{3,4} \text{ м}^2/\text{м}^3$ ) давало при высоте 13 500 м максимальную переносимую разницу давлений в 77,5 мм рт. ст.; при высоте 14 400 м — 64,5 мм рт. ст. и при 15 500 м — 51,7 мм рт. ст. Эксперименты с участием человека полностью подтвердили теоретические предвидения и правильность формулы Свinea и Гэге.

Однако эти заключения содержат ошибку, потому что если экспериментальные данные Свinea и Гэге являются вполне достоверными, то их подсчет коэффициента утечки защитной одежды (скафандр) был неточный. На самом деле для этого подсчета необходимо было пользоваться не общим объемом скафандра, а объемом, соответствующим действительному содержанию газов. Объем тела человека в одежде не должен был входить в расчет, его необходимо было вычесть из общего объема скафандра. Реальный объем может быть или измерен, или вычислен после осуществления декомпрессии, используя полученные при этом экспериментальные данные. Можно рассчитать с помощью установленной нами формулы [глава III, формула (21)], что в опытах Свinea реальный объем был не 85 л, а только приблизительно 20 л. Коэффициент утечки в действительности был равен  $1/_{2,5} \text{ м}^2/\text{м}^3$ , а не  $1/_{9,2} \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Значит, разница давлений в 142 мм рт.ст. являлась пределом переносимости для человека при конечной высоте 13 500 м и коэффициенте утечки  $1/_{2,5} \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Таким же образом мы подсчитали, что для этой же высоты и коэффициента утечки  $1/_{3,4} \text{ м}^2/\text{м}^3$  разница давлений в 77,5 мм рт. ст. вполне переносима, т. е. мы пришли к заключению, совершенно отличному от заключения Свinea и Гэге, а именно, что предел переносимой разницы давлений при данном коэффициенте утечки не изменяется значительным образом с изменением высоты и не зависит от относительного расширения газов, содержащихся в замкнутых полостях.

Если сопоставить исправленные результаты и условия эксперимента с участием человека в опытах Свinea и результаты, полученные на животных Хитчкоком, то мы не

увидим ни новых данных, ни какого-либо несоответствия. Результаты, полученные в исследованиях с участием человека, подтверждают хорошую переносимость декомпрессии при коэффициентах утечки, меньших  $1/50 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , и при отношении давлений ниже 4 и подчеркивают опасность коэффициентов утечки, близких к  $1/2 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , как только отношение давлений достигнет 2,3.

Исследования на животных и с участием человека ясно показали, что после определенных пределов взрывная декомпрессия, несмотря на хорошую общую устойчивость организма, может представлять опасность для некоторых органов и вызвать, в частности, повреждения легких.

## В. Совместные исследования Гэге и Свина

Выясним физические факторы, совокупность которых определяет опасность взрывной декомпрессии. Для Свина и Гэге [32] этими факторами являются относительное расширение газов в замкнутых полостях и время декомпрессии.

В самом деле, по Свинею [69], объем легких может быть без какой-либо опасности мгновенно увеличен в 2,1 раза. Относительное расширение, меньшее или равное 2,1, будет безопасным, каково бы ни было время декомпрессии. Но, когда относительное расширение значительно, а время декомпрессии очень мало, легкие могут растянуться настолько, что если не будут созданы условия для свободного выхода воздуха из легких, то произойдет разрыв легочной ткани.

Таким образом, Свина и Гэге пришли к выводу, что разрыв легких при декомпрессии тесно связан со временем, за которое происходит данная декомпрессия.

Для этих авторов, как мы уже указали, расширение газов, вызванное взрывной декомпрессией, и относительное расширение газов в замкнутых полостях являются идентичными и могут быть выражены известной формулой относительного расширения [26, 28]

$$E = \frac{p_k - 47}{p_a - 47}, \quad (1)$$

где  $p_k$  — давление в кабине в мм рт. ст.;

$p_a$  — давление атмосферы на конечной высоте в мм рт. ст.;

47 — давление насыщенного водяного пара при  $37^\circ\text{C}$  в мм рт. ст.

Эта формула выражает отношение  $\frac{V_{\text{кон}}}{V_{\text{нач}}}$ , т. е. отноше-

ние конечного объема газов (после приведения его к 37° и состоянию насыщения водяным паром) к начальному объему. Уже в работах Свиная и Иоффе [69, 70] авторы на основании экспериментальных данных стремились найти уравнение, связывающее величину газового расширения и время декомпрессии, исключая 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 Свинаю [31] критерий безопасности

$$E \leq 2,1 + 17t. \quad (2b)$$

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  $m^3/m^2$ ;

$p_k$  — давление в кабине;

$p_a$  — атмосферное давление на конечной высоте.

Давления  $p_k$  и  $p_a$  должны быть выражены в одинаковых 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.

Однако такие предположения спорны по следующим причинам.

1. Повреждения в легких носят в основном характер кровоподтеков и точечных кровоизлияний, которые трудно объяснить разрывом легочной ткани.

2. В связи с отсутствием экспериментальных данных нет оснований считать, что расширение легких точно следует за декомпрессией.

3. Газы замкнутых полостей, будучи насыщенными водяными парами при  $t = 37^\circ$ , не следуют при взрывной декомпрессии закону (1), как это предполагал при своих экспериментальных исследованиях Желфанд [34].

4. В связи с отсутствием экспериментальных данных нет оснований заключать, что отношение между предельным расширением и временем декомпрессии является линейным.

Итак, закон безопасности Свиная и Гэге основывается не только на ошибочных, хотя и поправимых, экспериментальных данных, но и на весьма спорных теоретических основах. Этот закон требует новых, более точных исследований. Мы, однако, должны быть признательны Свинаю и Гэге, сделавшим первые попытки выяснить и выразить в виде уравнений условия безопасности взрывной декомпрессии.

\* \* \*

В этой главе мы рассмотрели и подытожили все исследования по взрывной декомпрессии. В результате этого стало возможным выделить, что можно рассматривать как достоверное и что является спорным. Стали понятными право и цель исследований, которые были нами предприняты.

Из рассмотренных работ вытекают два основных положения.

1. Совокупность экспериментов над животными и исследований с участием человека позволяет сделать вывод, что при некоторых величинах коэффициента утечки и отношения давлений при взрывной декомпрессии могут наблюдаться повреждения различных органов, чаще всего легких.

2. Не имея возможности объяснить механизм этих повреждений, можно, однако, сказать, что повреждения возникают вследствие повышения внутрилегочного давления, зависящего от основных условий декомпрессии — коэффициента утечки и отношения давлений.

Таким образом, существуют две возможности избежать опасного повышения внутрилегочного давления в условиях декомпрессии. Наиболее простой способ — это добиться того, чтобы декомпрессия в кабине была всегда медленнее, чем декомпрессия в легких \*. Но осуществление подобных условий требует знания закона декомпрессии в кабине и закона декомпрессии в легких. Мы изучили эти законы.

Второй способ — это уменьшить отношение давлений. Возможны следующие два механизма действия этого уменьшения.

1. Если грудная клетка расширяется, точно следуя понижению окружающего давления, как это допускали Свиней и Гэге, а также многие другие авторы, то увеличение объема грудной клетки будет уменьшать начальное повышение давления в легких. В связи с этим растяжение альвеолярных стенок будет наблюдаться только на втором этапе, когда в легких установится повышенное давление, которое легко подсчитать.

2. Если грудная клетка расширяется с некоторым опозданием, расширение ее будет уменьшать повышение давления в легких тоже с некоторым опозданием, и тогда будет наблюдаться преходящее повышение давления.

Только эксперименты и изучение физиологических изменений позволяют нам вскрыть действительные механизмы. Для этого необходима точная регистрация начальных явлений, которые происходят в течение сотых долей секунды и могут быть искажены при пользовании общеизвестными системами регистрации. Все это ставит необычную техническую проблему, которую мы должны решить.

В настоящее время мы можем регистрировать и измерять с большой точностью мгновенные изменения основных физиологических функций под влиянием взрывной декомпрессии и извлечь из наших данных все лучшее и более полезное для понимания механизмов, играющих роль в возникновении повреждений.

Ввиду чрезвычайной важности аппаратуры и приборов при изучении взрывной декомпрессии мы начнем изложение наших исследований с описания применявшейся нами техники.

---

\* Это предложение теоретически ошибочно, так как добиться того, чтобы давление в кабине во время декомпрессии уменьшалось медленнее, чем давление в легких, невозможно.—*Прим. ред.*

---

## Г л а в а II

# ТЕХНИКА, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗРЫВНОЙ ДЕКОМПРЕССИИ

Использованную нами технику для изучения взрывной декомпрессии можно разделить на технику имитации декомпрессии в кабине, технику регистрации декомпрессии в кабине, технику физиологических исследований и технику регистрации физиологических процессов.

Техника имитации декомпрессии не отличается от той, которую использовали начиная с 1938 г. Гарсо [33] и Бержере [5]. Техника регистрации декомпрессии, заимствованная из промышленности, характеризуется высокой абсолютной точностью записи в отрезки времени, достигающие тысячных долей секунды. Техника регистрации физиологических процессов, на которую мы обращаем особое внимание, также обладает достаточной точностью. Но если эта весьма высокая точность регистрации не предъявляет каких-либо требований к существующей технике имитации декомпрессии, то она определяет некоторые требования к технике физиологических исследований.

Вначале мы опишем технику имитации и регистрации декомпрессии, а затем рассмотрим технику регистрации физиологических процессов, которая определяет особенности техники физиологических исследований.

### ТЕХНИКА ИМИТАЦИИ И РЕГИСТРАЦИИ ДЕКОМПРЕССИИ

#### Техника имитации декомпрессии в кабине самолета

Для имитации декомпрессии в кабине самолета применялась двойная камера. Она состояла, как указывали выше, из малой камеры (или «кабины») и большой камеры (или «емкости»), которые сообщались специальным устройством, позволяющим мгновенно соединить их между собой. При

этой технике давление в малой камере приводится к давлению кабины самолета, а затем, при сообщении ее с большой камерой, быстро падает до конечного давления, соответствующего высоте полета. Отверстие, соединяющее камеры, закрывается плотным целлофановым листом. Разрушение этого листа ударным механизмом, приводящимся в действие извне, приводит к декомпрессии в малой камере.

Объем большой камеры составлял  $30 \text{ м}^3$ . Малая камера в первых опытах (1951—1952 гг.) размещалась внутри большой и имела объем  $0,36 \text{ м}^3$ . Начиная с 1953 г. мы использовали внешнюю подвижную «кабину» объемом  $1,20 \text{ м}^3$ , которая плотно укреплялась в двери большой камеры.

Площадь отверстия «кабины» объемом  $0,36 \text{ м}^3$  была равна  $0,13 \text{ м}^2$ . При этом достигался коэффициент утечки  $1/2,77 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . При помощи диафрагмы отверстие могло быть уменьшено до  $0,049 \text{ м}^2$  (коэффициент утечки  $1/7,34$ ).

Площадь отверстия «кабины» объемом  $1,20 \text{ м}^3$  была равна  $0,37 \text{ м}^2$  (коэффициент утечки  $1/3,24 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ), но могла быть уменьшена различными диафрагмами до  $0,005 \text{ м}^2$  (коэффициент утечки  $1/240 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ).

Обе «кабины» были снабжены двумя внешними трубопроводами с регуляторами. Один из трубопроводов соединял «кабины» с большой камерой, другой — с внешней атмосферой. Таким образом, в малых камерах можно было создать все промежуточные высоты между землей и высотой большой камеры. Кроме того, постоянное сообщение с атмосферой позволяло создавать хорошую вентиляцию этих камер. Наконец, независимые трубопроводы большого сечения позволяли в любой момент послать чистый кислород в малые камеры, если в этом появлялась необходимость.

## Техника регистрации декомпрессии

Чтобы вывести экспериментальный закон декомпрессии, необходимо зарегистрировать внутреннее давление камер с большой точностью при общей продолжительности явления в несколько сотых долей секунды.

Мы использовали прибор Флёри [23], предназначенный в принципе для изучения изменений давления как функции времени в цилиндрах авиационных двигателей. Основной частью этого прибора является датчик, емкость которого изменяется в зависимости от изменения давления. Измене-

ние емкости преобразуется в изменение частоты переменного электрического тока, проходящего через конденсатор. Выход преобразователя соединен с отклоняющими пластинками катодного осциллографа. Отклонение луча осциллографа регистрируется фотографической камерой с вращающимся барабаном (тремограф). Линейная скорость фотографической бумаги шириной 12 см составляет в аппарате 18 м/сек. Отметка времени в 1 мсек достигается разрядником, дающим периодические искры, фиксируемые на бумаге. Точность воспроизведения изменений давления до 50 000 периодов в секунду, чувствительность аппарата и величина отклонения луча, равная 12 см, позволяет регистрировать процессы, происходящие в тысячные доли секунды.

При исследованиях датчики укреплялись на боковых стенках малой камеры таким образом, чтобы чувствительная мембрана находилась на уровне стенки.

## ТЕХНИКА РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРО ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### Требование к технике регистрации

Точная, с большой чувствительностью, регистрация процессов, протекающих в сотые доли секунды в условиях быстрого изменения окружающего давления, ставит необычную техническую проблему. Укажем основные моменты, которыми мы руководствовались в выборе техники регистрации этих процессов.

Зарегистрировать явление — это значит привести запись в соответствие с изменениями этого явления. Необходимо прежде всего воспринять все изменения, затем преобразовать их по возможности в сигнал, пропорциональный величине изменений и удобный для передачи. В этом и состоит роль датчика. Преобразованный сигнал передается на запись непосредственно (без усиления) или после соответствующего усиления. Наконец, следует процесс записи.

Среди физиологических явлений, доступных измерению, чувствительны к мгновенным изменениям во время быстрых декомпрессий только явления, отражающие физические процессы (давление, расширение, изменение потенциала); химические процессы изменяются всегда постепенно и поступательно. Регистрация электрических, быстро проходящих процессов хорошо известна. Некоторые особенности

представляет только регистрация быстро меняющихся давлений в легких и расширения грудной клетки.

Сначала мы изучим различные типы датчиков давления и расширения, которые отвечают требованиям наших исследований.

Удобно классифицировать датчики соответственно тем преобразованиям сигналов или явлений, которые они осуществляют, т. е. путем обозначения, с одной стороны, воспринимаемого и преобразуемого ими явления и, с другой стороны,— передаваемого сигнала или явления.

Таким образом, можно рассматривать:

1. Воспринимаемое и преобразуемое явление: изменение длины.

Передаваемое явление:

- а) изменение давления газа;
- б) изменение давления жидкости;
- в) изменение полного электрического сопротивления (омического, индуктивного и емкостного).

Преобразование изменения длины в изменение давления газа, очевидно, зависит от изменения давления окружающего воздуха. Опыты показали, кроме того, невозможность измерения значительного изменения длины, происходящего за время в  $1/100$  сек, и любыми другими методами, если приходится использовать эластичный посредник, закон изменения которого является неопределенным.

Поэтому мы вынуждены были отказаться от регистрации расширения грудной клетки и брюшной полости, происходящего за время  $1/100$  сек. Для этого необходимо использовать киносъемку с большой скоростью и косвенные методы, в частности измерение давления в легких.

Преходящие изменения давления продолжительностью в  $1/100$  сек выявляются, как мы уже проверили, в явлениях, зарегистрированных и измеренных с достаточной точностью.

2. Воспринимаемое и преобразуемое явление: изменение давления.

Передаваемое явление:

- а) изменение давления газа;
- б) изменение давления жидкости;
- в) изменение отклонения луча света;
- г) изменение полного электрического сопротивления (омического, индуктивного и емкостного).

Изменение давления газа, очевидно, зависит, как и в предыдущем случае, от изменения давления окружающего воздуха.

На изменение давления жидкости оказывает влияние очень большой собственный период колебаний жидкостного манометра.

На изменение отклонения луча света в оптическом приборе влияет низкая собственная частота мембранны манометра (10 000 периодов в секунду).

Что касается изменения электрического сопротивления, то оно зависит от типа датчика.

Датчики с переменным сопротивлением (тензометрические) имеют собственную частоту не более нескольких сот периодов в секунду; этот тип датчиков является, следовательно, весьма ограниченным.

Датчики с переменной индуктивностью имеют несколько большую собственную частоту и поэтому более выгодны. Однако пределы измерений этих датчиков слишком близки к границам измерений, обусловленным требованиями наших экспериментов, в которых явления происходят за время  $\frac{1}{100}$  сек.

Датчики с переменной емкостью, представляющие собой манометры с металлической подвижной мембраной, используемой в качестве пластины переменного конденсатора, имеют собственную частоту, близкую к частоте оптических манометров (более 10 000 периодов в секунду).

Вышеприведенный анализ позволил выявить, что нашим требованиям отвечают только два вида датчиков, вернее, два варианта одного и того же вида: манометры с мембраной и с оптической передачей и датчики с переменной емкостью и электрической передачей. Это привело к необходимости изучения устройства и качества передач. Перемещение мембранны при изменении давления, заданного теоретически, весьма ничтожно, поэтому передача сигнала должна происходить обязательно с усилением.

Учитывая вышесказанное, необходимо разобрать две системы передач: оптическую и электрическую.

Возможно применение обеих систем, но оптическая система практически менее удобна. В самом деле, отсчет по величине перемещения мембранны оптического манометра, если требуется достаточная чувствительность, приводит к необходимости использования оптического плеча большой длины (больше метра). Это в свою очередь диктует необходимость абсолютной неподвижности системы источник

света — манометр — регистратор. Применение такой системы для регистрации явлений, происходящих при взрывной декомпрессии, сильно усложняется из-за невозможности использования достаточно обширной камеры. При пользовании же камерами малого объёма источник света и регистрирующий аппарат приходится располагать с внешней стороны камеры. Часть оптической передачи в этом случае обязательно проходит через иллюминатор, что приводит к требованию производить исследование в полуторе. Несмотря на бесспорные преимущества оптических манометров, мы предпочли датчик, имеющий такую же большую собственную частоту, но позволяющий использовать более гибкое средство передачи, т. е. датчик с переменной емкостью и электрической передачей. При этом имеется возможность поместить датчик в камере, где протекает взрывная декомпрессия, и отпадает необходимость заботиться о размещении системы передачи в точно определенном положении по отношению к датчикам.

Из различных систем электрической передачи и усиления перемещения мембран датчиков мы считаем лучшей систему с частотной модуляцией, характеризующуюся большой стабильностью и весьма малыми искажениями.

Малая величина периода явлений (сотые доли секунды) и использование измерительных приборов с частотной модуляцией вызывают необходимость применения для регистрации явлений катодного осциллографа с фотоприставкой. Регистрация движения катодного луча по экрану осциллографа производится на ленте регистрирующего механизма, перемещающейся со скоростью, позволяющей получить развертку кривой изменения давления.

Но, чтобы точно изучить быстро протекающие биологические процессы, необходимо дополнить запись изменяющегося с большой скоростью основного явления регистрацией изменения давлений в легких и брюшной полости перед декомпрессией и во время самой декомпрессии. Регистрацию давлений необходимо производить с замедленной скоростью вращения, чтобы получить удобную для чтения линию. Одновременная параллельная регистрация одного и того же процесса (с двумя различными скоростями вращения) может осуществляться или включением оптической записи между осциллографом и фотоприставкой, или второй системой регистрации, подключающейся в линию передачи. Это последнее решение не представляет никакой дополнительной трудности с точки зрения электронной тех-

ники, но обычно не предусматривается конструкторами, несмотря на очевидный интерес.

Все эти требования привели к тому, что для регистрации физиологических процессов (давление, расширение) нами был выбран прибор Флёри, в который были внесены необходимые изменения.

Рассмотрим основные характеристики этого прибора.

### Описание регистрирующего прибора

**Датчик с переменной емкостью.** Основой электрической схемы датчика является колебательный контур, состоящий из конденсатора переменной емкости, дроссельной катушки и сопротивления.

Переменным конденсатором служит мембранный манометр, состоящий из конической камеры объемом около  $1 \text{ см}^3$ , дно которой закрыто чувствительной металлической мембраной. Максимальное среднее отклонение мембраны при сохранении линейности составляет не более  $10^{-3} \text{ см}$ . Встречающееся в наших опытах среднее отклонение мембраны равно  $10^{-4} \text{ см}$ , что соответствует изменению объема камеры на  $10^{-8} \text{ см}^3$ . Собственная частота мембраны значительно превышает 10 000 периодов в секунду, что вполне достаточно для наших условий.

Измеряемое давление действует на подвижную мембрану и перемещает ее до тех пор, пока не уравновесится силами упругости мембраны. Перемещение мембраны вызывает изменение емкости конденсатора, образованного мембраной (подвижная пластина) и неподвижной пластиной, помещенной рядом. Таким образом, колебания давления преобразуются в механическое перемещение, а это последнее — в изменение емкости.

Одним из преимуществ этого типа датчиков являются его прочность и простота устройства. Мембрана датчика легко заменяется, что позволяет подобрать чувствительность прибора в соответствии с любым диапазоном измерений.

**Измеритель емкости.** Как мы видели, емкостный манометр преобразует изменения давления в изменения емкости. После этого необходимо преобразовать колебания емкости в колебания напряжения. Это осуществляется специальным измерителем емкости, в котором используется частотная модуляция. Это устройство состоит из высокочастотного генератора, усилителя и частотного детектора.

На выходе детектора появляется изменение напряжения, пропорциональное изменению емкости. Это изменение напряжения далее усиливается и подается на осциллограф.

Особенностью измерителя емкости, предназначенного для физиологических целей, является то, что он имеет два выхода: один — для подачи напряжения на отклоняющие пластины катодного осциллографа, другой — для подачи мощности на клеммы шлейфного осциллографа.

Таким образом, имеется возможность двойной регистрации: визуальной (на катодном осциллографе) и графической (на шлейфном).

**Кабели связи.** Кабель, связывающий колебательный контур датчика с измерителем, и кабели, соединяющие измеритель с осциллографами, подобраны такими, чтобы прибор был не чувствителен к перемещениям и изгибам кабелей.

Значительная длина кабелей позволяет проводить опыты внутри «кабины», а регистрирующую аппаратуру вынести наружу.

**Система регистрации.** Для регистрации быстро меняющегося давления используются две системы регистрации: с большой скоростью и с малой скоростью.

Система с большой скоростью регистрации состоит из катодного осциллографа с четырьмя независимыми лучами, каждый из которых связан с выходом соответствующего измерителя. Перед осциллографом помещают специальную фотокамеру, обеспечивающую движение фотографической бумаги шириной 24 см, со скоростью от 10 см/сек до 5 м/сек (1,80 м/сек в наших опытах).

В системе регистрации с малой скоростью могут использоваться шлейфные осциллографы и гальванометры с чернильной записью. Оба этих прибора подключаются к выходам «шлейфы» измерителя емкости. В шлейфном осциллографе регистрация отклонения луча ведется на чувствительной бумаге шириной 12 см, которая протягивается с постоянной скоростью (0,25 или 2,5 см/сек) в двух независимых камерах.

Кроме того, имеется возможность наблюдать движение «зайчика» на матовом стекле. Таким образом, можно следить за изменениями явлений и в желаемый момент зарегистрировать их со скоростью, наиболее удобной для записи и расшифровки.

В качестве гальванометра с чернильной записью нами использовался пятиканальный регистратор типа RP5. Од-

нако использование этого регистратора требует включения дополнительной ступени усиления между выходом измерителя и регистратором.

**Отметка времени.** Отметка времени  $\frac{1}{100}$  сек достигается при помощи синхронизированных импульсов, посылаемых на выход каждого измерителя. Этот метод позволяет обнаружить и исправить на линии всякое горизонтальное отклонение одного из лучей. Возможность сообщать различное значение и различную интенсивность каждому из сигналов позволяет избежать всякой неясности в случае наложения или скрещивания лучей.

**Меры предосторожности при регистрации изменений давления.** Совокупность датчика, измерителя и системы регистрации позволяет воспринимать и осуществлять точную регистрацию изменения давления за время порядка  $\frac{1}{100}$  сек. Необходимо только, чтобы при передаче изменения давления, воспринятого датчиком, не вносились никаких искажений в начальное явление.

Чтобы быть уверенным в точной и четкой передаче за время до  $\frac{1}{100}$  сек быстро меняющихся давлений, экспериментатору необходимо соблюдать два основных условия.

1. Не допускать в системах передач от датчика, воспринимающего давления, до манометра даже малейшего пузырька воздуха.

2. Использовать соединительные трубы как можно большего диаметра (практически достаточно иметь внутренний диаметр 2 мм), как можно меньшей длины и как можно большей твердости, о чем предупреждал еще в 1903 г. Отто Франк [26], первый теоретик мембранных манометров.

Таким образом, можно максимально уменьшить или даже исключить какое-либо искажение в характеристике датчика, которая остается прямолинейной до частот, достаточно высоких, чтобы передать периодические явления, период которых значительно ниже собственной частоты датчика.

## ТЕХНИКА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время можно привести сравнительное изучение изменений в сотые доли секунды различного рода давлений (артериальное, венозное, давление спинномозговой жидкости, внутригрудное, внутрилегочное) в условиях быстрого изменения внешнего давления, встречающегося при взрывной декомпрессии.

Укажем следующие основные, чисто физиологические методики, применяющиеся нами во время опытов.

**Животное.** В качестве подопытного животного была использована собака.

**Наркоз.** В качестве наркотического вещества нами применялась хлоралоза, вводимая внутривенно в количестве 0,10 г на 1 кг веса животного.

**Кислородное обеспечение.** Камера наполнялась чистым кислородом или животное получало кислород через маску, связанную с системой непрерывной подачи кислорода. Эти два метода кислородного обеспечения достаточно распространены, но для высотных кабин пониженного давления первый метод является более удобным.

**Регистрация внутрисосудистого давления.** В желаемый сосуд вводились винилитовые трубы с внутренним диаметром 2 мм, связанные с соответствующим датчиком и наполненные раствором антикоагулянта \* (1% раствор гепарина \*\* на физиологическом растворе).

**Регистрация давления спинномозговой жидкости.** Игла для спинномозговой пункции большого диаметра (0,8 мм), связанная с датчиком винилитовой трубкой с внутренним диаметром 2 мм, вводилась в большую цистерну.

**Регистрация внутригрудного внеплеврального давления.** Обычными методами измерять при декомпрессии внутриплевральное давление нельзя. Игла, введенная в полость плевры, во время декомпрессии может сместиться и ранить легкое. Введение в полость плевры плоского баллончика из неэластичного винилита не рекомендуется, так как в этом случае вокруг швов отверстия, в которое вводится трубка соединения баллончик — датчик, плевральная ткань под действием давления во время декомпрессии разрывается. Поэтому лучше определять не внутриплевральное, а внутригрудное внеплевральное давление.

В наших опытах для этого вводился плоский винилитовый баллончик между грудной стенкой и правой плеврой несколько выше грудной кости. Баллончик укреплен на винилитовой трубке с внутренним диаметром 2 мм. Трубка и баллончик заполнены физиологическим раствором, температура которого равна температуре тела живот-

---

\* Антикоагулянт — вещество, применяемое для предупреждения свертывания крови.— Прим. ред.

\*\* Гепарин (от лат. *hepar* — печень) — добываемое из печени животных вещество, которое при введении в кровь препятствует свертыванию последней.— Прим. ред.

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 трубы 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 жидкые 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 большим или меньшим повышением давления в зависимости от больших или меньших 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 внутрileгочного 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-

следующего их сравнения. Такое сравнение должно позволить определить предельные значения коэффициента утечки, при которых скорость декомпрессии кабины была бы все время меньше максимальной скорости декомпрессии в легких.

Это сравнение может привести к весьма простым результатам, если полые органы, сообщающиеся с внешней средой (и в частности, легкие), и кабина следуют одинаковым математическим законам, как это логично было бы ожидать.

Итак, мы пришли к необходимости изучения:

- 1) закона декомпрессии в кабине;
- 2) закона декомпрессии в легких.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ЗАКОН ДЕКОМПРЕССИИ В КАБИНЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ

Невозможно точно изучить действие взрывной декомпрессии на живой организм, если игнорировать способ, которым осуществляется декомпрессия в кабине.

Особенно важно знать закон изменения давления в кабине во времени. Однако отдельные авторы ограничивались изучением общей продолжительности декомпрессии и не проявляли интереса к изучению изменения давления в кабине во времени, забывая, что для получения ясного и точного представления о действии декомпрессии на организм знания ее общей продолжительности далеко недостаточно.

### Закон декомпрессии

Для изучения декомпрессии и ее законов необходимо прежде всего осуществить достаточно точную и подробную регистрацию декомпрессии, чтобы можно было потом провести математический анализ полученных данных. Нами была осуществлена серия регистраций изменений давления в кабине во времени с помощью ранее описанного аппарата Флёри [23]. Было использовано два коэффициента утечки  $F_1 = 1/2,77$  и  $F_2 = 1/7,34 \text{ м}^2/\text{м}^3$  и отношения давлений от 1,45 до 6,71. Начальная температура была  $15^\circ\text{C}$  и относительная влажность воздуха 70%.

Из сорока поставленных в 1952 г. опытов мы отобрали 24 записи, из которых 20 относятся к опытам с коэффи-

циентом утечки  $1/2,77 \text{ м}^2/\text{м}^3$  (рис. 1). В дальнейшем мы провели математический анализ этого материала. Развертка кривых декомпрессии во времени (по оси абсцисс отложено время в миллисекундах, по оси ординат — давление в мм рт. ст.) и чувствительность регистратора позволяли проводить такое изучение с достаточной точностью.

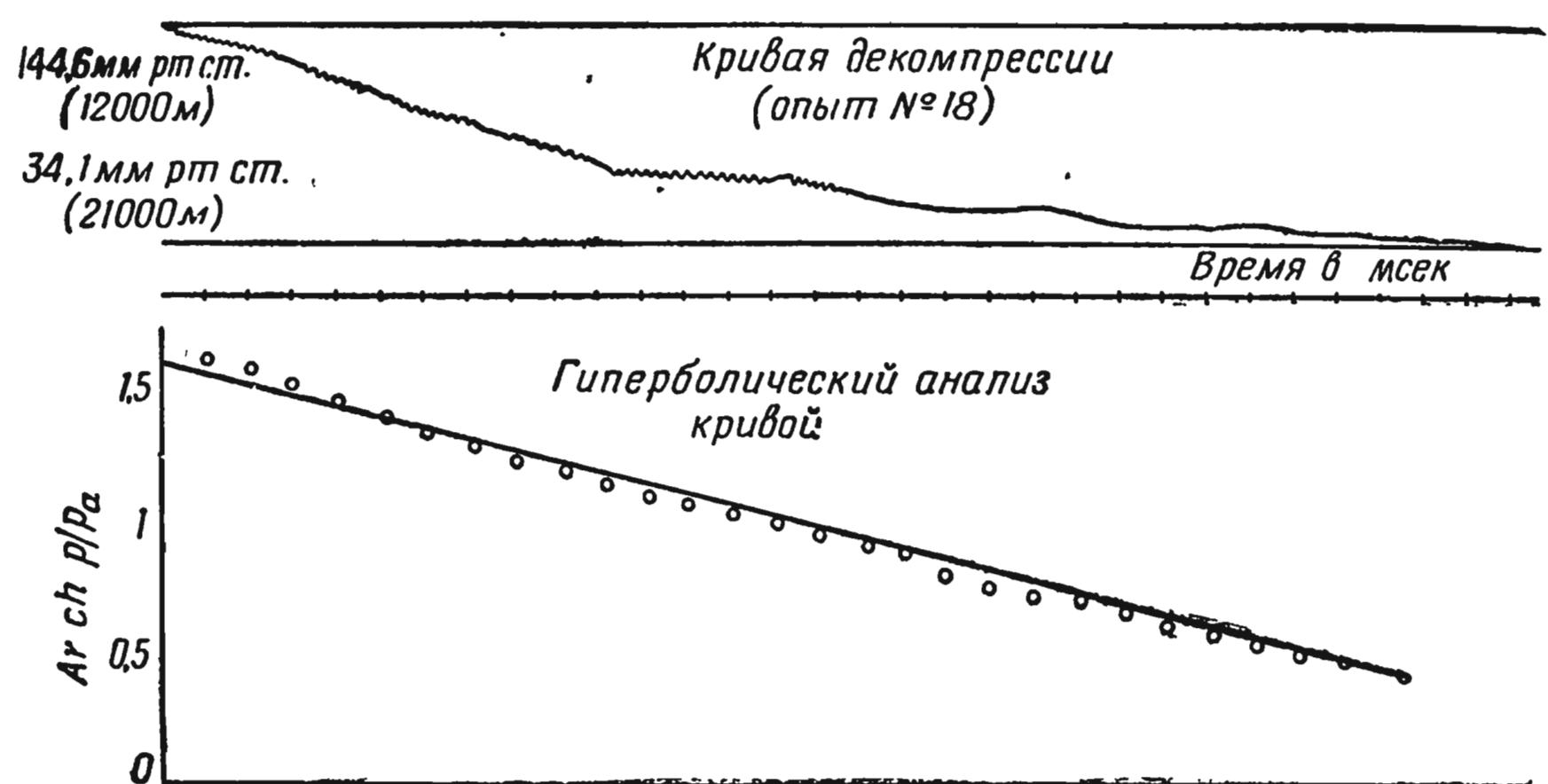


Рис. 1. Кривая декомпрессии в условиях взрывной дёкомпрессии (вверху) и ее гиперболический анализ (внизу)

Начальная высота 12 000 м (144,6 мм рт. ст.); конечная высота 21 000 м (34,1 мм рт. ст.).

Видно, что зависимость  $\text{Ar ch } \frac{p}{p_a}$  от времени представляет собой прямую линию

Мы успешно зарегистрировали абсолютные величины давления  $p$  в кабине и его изменение во времени, а также относительное уменьшение изменения этого давления при приближении к конечному давлению  $p_a$  и построили графики, отражающие изменение отношения давлений  $\frac{p}{p_a} = r$  как функции времени.

Исследование и сравнение различных графиков позволяет установить общую направленность изменения и подсказывает единственную зависимость изменения отношения давления  $r$  от времени. Эта зависимость характеризуется следующими особенностями.

1. Для времени, равного продолжительности истечения газов при декомпрессии (или времени декомпрессии  $t_0$ ),

отношение  $\frac{p}{p_a} = 1$ , т. е. конечное давление  $p$  в кабине равно внешнему атмосферному давлению  $p_a$ . При этом график изменения давления в кабине будет представлять собой касательную к кривой декомпрессии, параллельную оси времени.

2. Натуральный логарифм выражения  $\frac{p}{p_a} + \sqrt{\left(\frac{p}{p_a}\right)^2 - 1}$  имеет линейную зависимость от времени.

Следовательно, между отношением  $\frac{p}{p_a} = r$  (отношение начального давления к конечному) и временем  $t$  имеется гиперболическая зависимость вида

$$\operatorname{Arch} r = -K(t - t_0); \quad (1a)$$

$$r = \operatorname{ch} [-K(t - t_0)], \quad (1b)$$

где  $K$  — экспериментальный коэффициент, который мы назовем коэффициентом декомпрессии и который в дальнейшем изучим;

$t_0$  — время, соответствующее общей продолжительности декомпрессии; это время может быть подсчитано с помощью уравнения (1а), если в нем принять  $t=0$  и взять  $R$  вместо  $r$ :

$$t_0 = \frac{1}{K} \operatorname{Arch} R, \quad (2)$$

где  $R = \frac{p_k}{p_a}$ , а  $p_k$  — начальное давление в кабине.

В течение 1953 г. было зарегистрировано 57 других кривых декомпрессии, которые позволили нам установить точность формул (1а) и (1б). Более того, мы располагали кривой декомпрессии (рис. 2, вверху), полученной в 1952 г. Жиллеспи в Лаборатории авиационной медицины [39] при коэффициенте утечки  $1/56,8 \text{ м}^2/\text{м}^3$  и отношении давлений  $R = \frac{p_k}{p_a}$ , равном 8,6. (Система регистрации, примененная им, была аналогична нашей.)

Проведенный нами гиперболический анализ этой кривой (рис. 2, внизу) показал, что зависимость отношения давлений от времени выражается уравнениями (1а) и (1б). Следовательно, можно заключить, что давление при декомпрессии является не линейной, а гиперболической функцией времени  $t$  и что изменение среднего давления,

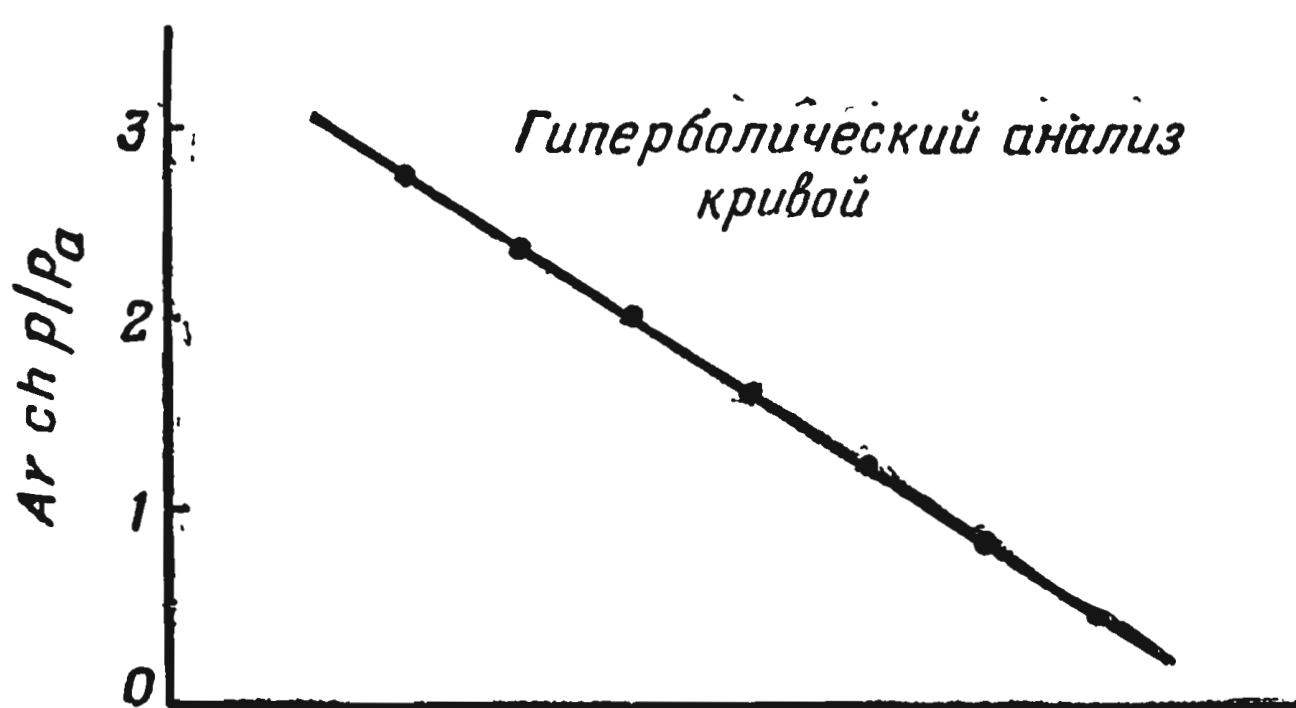
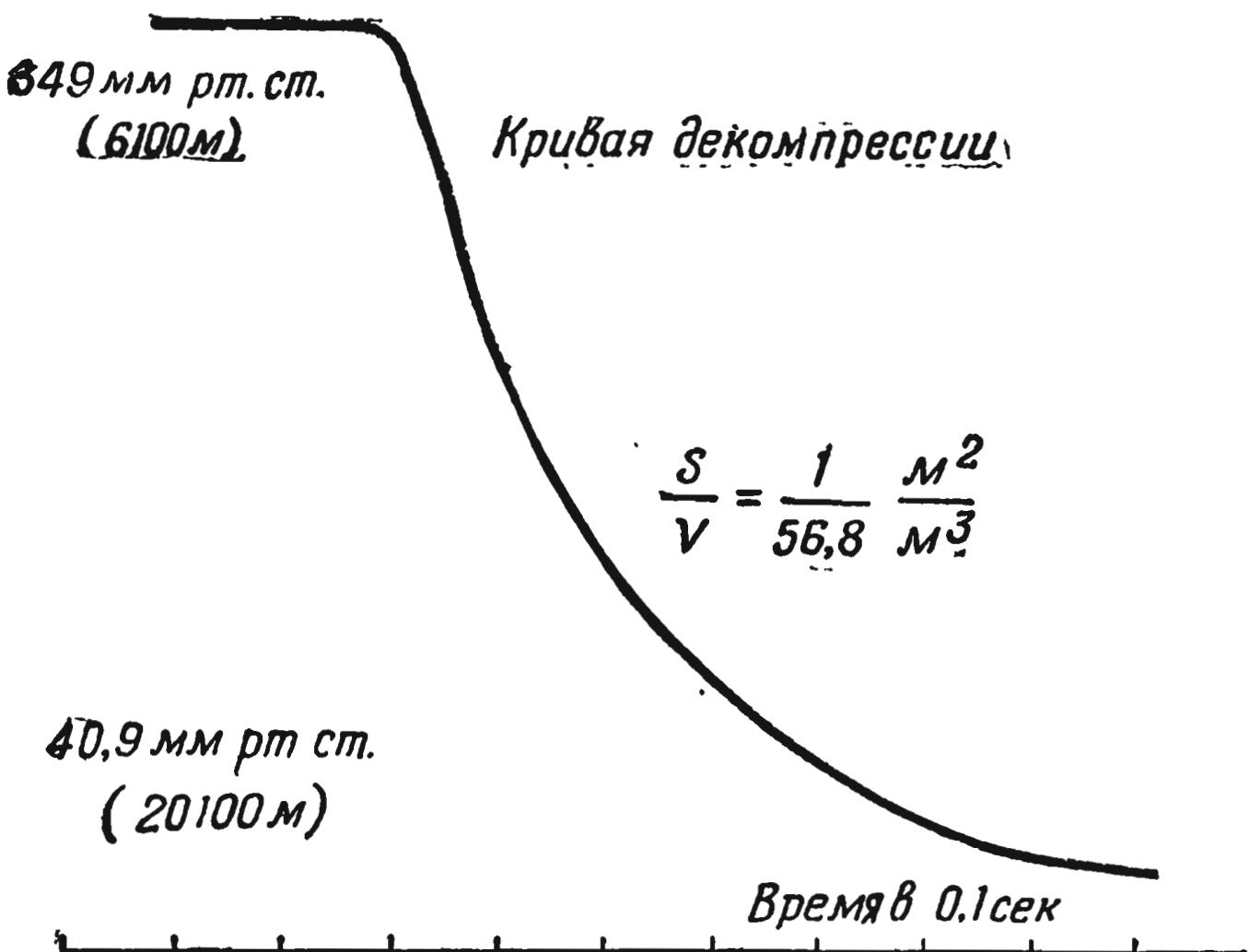


Рис. 2. Кривая декомпрессии в условиях взрывной декомпрессии (вверху), взятая из работы Жилеспи [39], и ее гиперболический анализ (внизу). Начальная высота 6100 м (349 мм рт. ст.); конечная высота 20100 м (40,9 мм рт. ст.).

Видно, что зависимость  $\text{Ar ch } \frac{p}{p_a}$  от времени представляет собой прямую линию

предложенное различными авторами как метод сравнения взрывных декомпрессий, не может дать точного определения изменения давления в кабине.

Пользуясь эмпирическими формулами (1а) и (1б) и классическими формулами термодинамики, можно легко определить все элементы, которые зависят от давления, плотности и температуры газа внутри камеры.

### Скорость декомпрессии

Из уравнений (1а) и (1б) следует:

$$\frac{dr}{dt} = -KV\sqrt{r^2 - 1} \quad (3а)$$

и

$$\frac{dp}{dt} = -KV\sqrt{p^2 - p_a^2}. \quad (3б)$$

Уравнение (3а) выражает относительную скорость, а уравнение (3б) — абсолютную скорость декомпрессии.

Эти уравнения особенно интересны. Они являются общим выражением эмпирического закона декомпрессии в его дифференциальной форме. В дальнейшем они будут нам необходимы, когда будет изучено определение коэффициента  $K$ . Эти уравнения позволяют показать, что при декомпрессии давление быстро уменьшается со временем.

Интересно отметить, что из уравнения (1а) можно вывести следующие два очень простых и очень показательных уравнения (Монье и Виолетт [63]):

$$\frac{d^2r}{dt^2} = K^2r, \quad (4а)$$

$$\frac{d^2p}{dt^2} = K^2p, \quad (4б)$$

т. е. в каждый момент:

- 1) изменение относительной скорости декомпрессии пропорционально мгновенному отношению давлений  $r$  (4а);
- 2) изменение абсолютной скорости декомпрессии пропорционально давлению  $p$  (4б).

Система уравнения (4а) и (4б) предельно проста. Естественно предположить, что она дает возможность весьма легкого решения. Но эта простота является только кажущейся и не должна вызывать каких-либо иллюзий.

## Плотность газа внутри кабины

Если обозначить отношение плотности газа  $\rho$  в кабине в каждый момент  $t$  к плотности газа  $\rho_a$  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

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

Таким же образом можно подсчитать относительные значения удельного объема и температуры. Итак, эмпирические уравнения (1а) 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  $\rho$  — плотность газа в кабине в каждый данный момент;

$S$  — площадь отверстия утечки;

$\rho_0$  — 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  $p_a$ ;

$\rho_a$  — плотность газа при конечном давлении  $p_a$ .

Уравнение (7б) 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  $r$  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  $r_{kp}$ ), 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  $r_{kp}$ .

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  $r_{kp} = \frac{p}{p_0}$  было

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

Эта формула позволяет подсчитать критическое давление в кабине

$$p_{kp} = p_a r_{kp}$$

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

**Сверхзвуковая фаза ( $p > p_{kp}$ ).** 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  $\rho_0$ .

Тогда имеем

$$p_0 = \frac{p}{r_{kp}}$$

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 ( $p < p_{kp}$ ).** 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 ( $p > p_{kp}$ )

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

2. Для дозвуковой фазы ( $p < p_{kp}$ )

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

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

$$\frac{dp}{dt} = p_a \sqrt{r^2 - 1} K, \quad (36)$$

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  $\kappa$ . 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

$$K = \frac{S}{V} \sqrt{n \frac{p_a}{\rho_a}} r^{\frac{n-1}{2n}} \cdot K'. \quad (15)$$

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  $\rho$  [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  $\text{Arch} r$  в зависимости от времени, можно достаточно легко менять этот коэффициент.

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

Таблица 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, $m^2/m^3$ | 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, $m^2/m^3$ | 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  $37^\circ C$ , 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  $+15^\circ C$  и 70% влажности показатель политропы, подсчитанный по общизвестным 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

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

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

Но если коэффициент  $K$  представлен уравнением (16), то для каждого коэффициента утечки  $F$  необходимо иметь определенную начальную температуру и отношение давлений  $R = \frac{p_k}{p_a}$ :

$$K = F \sqrt{\frac{p_k}{\rho_k}} R^{-\frac{n-1}{n}} K_c = F \sqrt{\frac{p_k}{\rho_k}} R^{-\frac{n-1}{2n}} K_c. \quad (17)$$

Таким образом, видно, что если коэффициент  $K$  представлен формулой (16) при условии постоянства коэффициента утечки и начальной температуры, то он должен быть пропорционален  $R^{-\frac{n-1}{2n}}$  — единственному изменяющемуся члену уравнения (17), т. е. должен удовлетворять отношению

$$KR^{\frac{n-1}{2n}} = \text{const} = F \sqrt{\frac{p_k}{\rho_k}} K_c, \quad (18)$$

удобному для экспериментальной проверки. Более того, если коэффициент  $K_c$  не зависит от  $F$ , нужно иметь в условиях уравнения (18) отношение

$$\frac{KR^{\frac{n-1}{2n}}}{F} = \text{const} = \sqrt{\frac{p_k}{\rho_k}} K_c, \quad (19)$$

откуда можно определить коэффициент  $K_c$ .

Итак, с помощью табл. 2 мы смогли легко определить значения коэффициентов декомпрессии, полученных в наших опытах, а используя эти значения, получить уравнение (20) (см. табл. 3).

Как указывалось выше,

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

где  $K_c = 0,9 \pm 0,02$ . Это значение коэффициента  $K_c$ , весьма близкое к коэффициенту сжатия, кажется нам достаточно точным.

Уравнение (16) в сочетании с уравнением (16) дает

$$r = \text{ch} K_c \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} (t_0 - t). \quad (20)$$

Так же преобразуются все выражения от (1) до (6), которые содержат  $K$  в его неразвернутой форме.

Установив экспериментальным путем постоянство коэф-

фициента  $K$  в течение каждой данной декомпрессии и пропорциональность  $K$  выражению  $\sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}}$ , мы получим интересные уточнения явлений и процессов, происходящих при истечении газа через отверстие.

Таблица 3

Значения  $v$ , подсчитанные по формуле (20) для каждого из двадцати четырех проведенных опытов

$$v = K_c \sqrt{\frac{p_k}{\rho_k}}; \quad R = \frac{p_k}{p_a}$$

| Номер опыта | $R$   | Коэффициент декомпрессии ( $K$ ) | $v$ , м/сек | Номер опыта | $R$   | Коэффициент декомпрессии ( $K$ ) | $v$ , м/сек |
|-------------|-------|----------------------------------|-------------|-------------|-------|----------------------------------|-------------|
| 1           | 1,445 | 94                               | 271,3       | 13          | 2,555 | 80                               | 246,2       |
| 2           | "     | 94                               | "           | 14          | "     | 78                               | 240         |
| 3           | 1,607 | 83                               | 242,1       | 15          | 2,952 | 83                               | 259,6       |
| 4           | 1,837 | 92                               | 272,9       | 16          | 3,304 | 84                               | 265,9       |
| 5           | 2,150 | 86                               | 259,6       | 17          | 4,144 | 84                               | 272,9       |
| 6           | "     | 87                               | 262,6       | 18          | 4,190 | 80                               | 260,2       |
| 7           | 2,286 | 87                               | 264,3       | 19          | 5,842 | 76                               | 256,7       |
| 8           | 2,555 | 86                               | 264,6       | 20          | 6,710 | 81                               | 277,7       |
| 9           | То же | 88                               | 270,8       | 21          | 1,445 | 34                               | 260         |
| 10          | "     | 77                               | 236,9       | 22          | 1,550 | 34                               | 262         |
| 11          | "     | 76                               | 233,9       | 23          | 2,555 | 32                               | 261         |
| 12          | "     | 80                               | 246,2       | 24          | 2,555 | 32                               | 261         |

$v_{cp} = 259,1$  м/сек. Возможное отклонение  $\sigma = \pm 5,85$  м/сек.

### Изотермный характер расширения газа при истечении его из отверстия

Логично предположить, что расширение газа внутри кабины происходит непрерывно и адиабатно и что в течение всего времени истечения газ в кабине охлаждается. Тогда зависимость истечения газа от времени можно подсчитать по формуле (1а). После работ Сен-Венана [6] специалисты по термодинамике пришли к выводу, что расширение газа в струе является тоже непрерывным и что в сверхзвуковом режиме [уравнения (10) и (12)] плотность газа в сечении отверстия находится в постоянном отношении с плотностью газа в кабине, но не зависит от плотности наружного воздуха. Такая гипотеза приводила, кроме всего прочего, к заключению об изменении скорости звука в плоскости отверстия и коэффициента  $K$  во время декомпрессии. Однако опыт показал, что коэффициент  $K$  был, напротив, крайне

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

$$\frac{dp}{dt} = \rho_a \frac{dr}{dt}. \quad (21b)$$

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

Очевидно,

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

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

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

Отсюда

$$v_{cp} = 2 \sqrt{\frac{p_k - p_a}{\rho_a(r+1)}} = 2 \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} \cdot \sqrt{\frac{r-1}{r+1}}. \quad (24)$$

Подставив это выражение в уравнение (7б), получим следующую формулу:

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} \rho_a \sqrt{r^2 - 1}, \quad (25)$$

откуда

$$\rho = \rho_a \operatorname{ch} \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} (t - t_0).$$

Используя эту формулу, можно решить уравнение (20) при постоянном коэффициенте истечения газа  $K_c$ .

Итак, на основе экспериментальных данных, а также гипотезы, которая может показаться смелой, мы получаем, формулу, весьма точно отражающую действительность. Эта гипотеза в общем не более неточна, чем те, которые приводят к формулам, менее отвечающим физической реальности, но зато она дает возможность достичь практических результатов.

### Продолжительность декомпрессии

Как мы уже видели, легко подсчитать общую продолжительность декомпрессии (или время декомпрессии) с помощью уравнения (2). Можно также подсчитать время, необходимое для изменения давления в кабине  $p_k$  до промежуточного давления между  $p_k$  и конечным давлением  $p_a$ .

Выражение

$$t_0 = \frac{1}{K} \operatorname{Ar ch} R = \frac{V}{S} \sqrt{\frac{\rho_a}{p_a}} \cdot \frac{1}{K_c} \operatorname{Ar ch} R \quad (2a)$$

позволяет подсчитать  $t_0$  с большой точностью.

Недостатком этой формулы, хотя и весьма простой, является необходимость употребления таблицы гиперболических функций. Однако этот недостаток можно устранить, преобразовав уравнение (2a) в логарифмическую функцию.

Известно, что

$$\operatorname{Ar ch} R = \ln(R + \sqrt{R^2 - 1}) = 2,3 \lg(R + \sqrt{R^2 - 1}),$$

и уравнение (2a), таким образом, преобразуется в уравнение

$$t_0 = \frac{V}{S} \sqrt{\frac{\rho_a}{p_a}} \cdot \frac{1}{K_c} 2,3 \lg(R + \sqrt{R^2 - 1}). \quad (26)$$

Эта формула легко подсчитывается с помощью таблицы десятичных логарифмов. Отметим, что для  $R > 3$  можно использовать приближенную формулу:

$$t_0 = \frac{V}{S} \sqrt{\frac{\rho_a}{p_a}} \cdot \frac{1}{K_c} 2,3 \lg 2R. \quad (2в)$$

Нет большого смысла сравнивать формулу (2а) с формулами времени декомпрессии, которые можно вывести из формулы истечения газа (7б) и уравнений (12) и (13), если мы раньше видели неприводимость формулы (1б). Напротив, интересно сравнить величины  $t_0$ , полученные при помощи формулы (2а), с данными, вычисленными по эмпирической формуле Гэге, которую мы приводили выше [гл. I, уравнение (3)]:

$$t_0 = \frac{1}{197} \cdot \frac{V}{S} \sqrt{r - 1}.$$

Переписав уравнение (2а) для начальных данных  $\rho_k$ ,  $p_k$  и  $R$ , найдем, что общая формула времени декомпрессии будет иметь вид:

$$t_0 = \frac{V}{S} \sqrt{\frac{\rho_k}{p_k}} R^{\frac{n-1}{2n}} \frac{1}{K_c} \operatorname{Arch} R. \quad (2г)$$

Из сравнения формулы Гэге с формулой (2г) видно, что в наших экспериментальных условиях (температура воздуха 15°, влажность 70%) эта формула особенно точна для зоны  $6,5 < R < 10$ , где ее ошибка колеблется от  $-2\%$  для  $R = 6,5$  до  $+2\%$  для  $R = 10$ . При этом очевидно, что точность формулы зависит для одинаковых начальных условий от показателя политропы  $n$  расширяющегося газа. Так, при  $n = 1$  точность в зоне  $1,5 < R < 3$  составляет от  $-3,2\%$  для  $R = 1,5$  до  $+4,1\%$  для  $R = 3$ .

Формулой Гэге можно пользоваться для определения общей продолжительности декомпрессии. Но во всех случаях, когда нельзя довольствоваться приблизительными результатами, необходимо применять формулу (2г).

Формула (2г) показывает важность показателя политропы  $n$  расширяющегося газа. Этот показатель для влажного воздуха может быть подсчитан или найден прямо по таблице. Но для влажных газов внутренних полостей организма, которые также испытывают декомпрессию, этот показатель неизвестен. Незнание закона расширения влажных газов приводит иногда к неточным теоретическим пред-

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 Югоно 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);

$\rho_a$  — 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

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

где  $R$  — отношение начального давления к конечному давлению.

Сравнение этой формулы с формулой Югоно 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.

---

---

## Глава IV

### ВЗРЫВ И РАСШИРЕНИЕ ГАЗОВ ОРГАНИЗМА ПРИ ВЗРЫВНОЙ ДЕКОМПРЕССИИ

Мы уже показали всю важность показателя политропы в выражении закона декомпрессии газа. Прежде чем исследовать, применим ли закон декомпрессии к полым органам, таким как легкие, которые сообщаются с внешней средой, следует изучить закон расширения газов, содержащихся во внутренних полостях организма, в зависимости от изменения давления и показателя политропы  $n$ , который ему соответствует.

Относительное расширение газов, содержащихся в полых органах, можно определить как отношение  $E = \frac{V_{\text{кон}}}{V_{\text{нач}}}$ , т. е. отношение конечного объема этих газов  $V_{\text{кон}}$  к начальному объему  $V_{\text{нач}}$ . Для газов, заключенных во внутренних органах и находящихся каждый момент под действием давления  $p$ , относительное расширение  $E$  будет также функцией начального давления  $p_k$  и конечного давления  $p_a$ . Уточним эту зависимость.

#### Формула Лавлейса и Гэге

Для Лавлейса и Гэге [60] и некоторых других авторов [27, 29, 69] относительное расширение  $E$  газов закрытых полостей представляет собой тот же процесс, что и декомпрессия. Гипотезы, приемлемые (и подтвержденные опытом) для случаев медленной декомпрессии, применяются и к взрывной декомпрессии, в частности, принимается постоянным насыщение газов водяными парами. Считается, что взрыв происходит при постоянной температуре и постоянном насыщении.

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  $37^\circ$  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

$$E = \frac{V_{\text{кон}}}{V_{\text{нач}}} = \frac{p_k - 47}{p_a - 47}. \quad (1b)$$

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 беспределное 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 (1b), 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 (1b), 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.

возможно при быстрой декомпрессии, происходящей в замкнутой полости.

Таким образом, теория и опыт показывают неприемлемость формул (1а) и (1б) для выражения закона мгновенного расширения газов при взрывной декомпрессии. Однако эти формулы интересно применить для вычисления относительного расширения и показателя политропы быстро расширяющегося газа, находящегося во внутренних органах.

Для контроля можно пользоваться неоспоримыми экспериментальными результатами Желфана [34].

## ВЫЧИСЛЕНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ОБЪЕМА И ПОКАЗАТЕЛЯ ПОЛИТРОПЫ ГАЗА ПРИ БЫСТРОМ РАСШИРЕНИИ

### Вычисление при помощи формулы Гульдберга и Моэна

Вначале предположим, что в случае взрывной декомпрессии нет теплообмена между содержимым и вместилищем, т. е. заранее условимся рассматривать процесс как адиабатный. В дальнейшем мы обсудим обоснованность этой гипотезы.

Газ, содержащийся в органах, состоит из нескольких компонентов. Он представляет собой смесь из воздуха, которым мы дышим (смесь кислорода и азота), углекислого газа, парциальное давление которого в тканях остается постоянным, и насыщенного водяного пара при 37°, т. е. компонента, способного к конденсации.

Во время быстрого расширения часть водяного пара этой смеси конденсируется, при этом освобождается теплота, которая передается неконденсируемой части смеси. Это весьма важная особенность, которая определенным образом влияет на характер расширения газа.

Поэтому адиабатное расширение такой смеси следует уже закону Лапласа не в его простой, а в обобщенной форме, т. е.

$$pV^n = \text{const}, \quad (3)$$

где  $V$  — молекулярный объем.

Но здесь показатель политропы легко изменяется во время протекания процесса и в связи с присутствием в

смеси конденсируемого компонента значительно отличается от того, который можно было бы подсчитать по правилу смесей. Таким образом, в этих условиях невозможно точно рассчитать степень расширения в зависимости от начального и конечного давлений.

### Построение графика давление — объем для расширения газов, содержащихся во внутренних органах

Для каждого компонента смеси и для каждой температуры расширяющегося газа можно подсчитать его давление  $p$  и молекулярный объем  $V$  при условии, что состав газа в начальных условиях известен. Между давлением  $p$  неконденсирующих компонентов и абсолютной температурой  $T$  смеси существует отношение, известное под именем закона Гульдберга и Моэна [73]. Этот закон выражается следующей формулой:

$$\begin{aligned} [(1 - N_e) C_p + N_e C_l] \ln T - \frac{R}{J} (1 - N_e) \ln p + \\ + (1 - N_e) \frac{L}{T} \cdot \frac{f}{p} = \text{const}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $N_e$  — молярная конденсирующаяся фракция;  
 $C_p$  — удельная молярная теплоемкость неконденсирующейся части при постоянном давлении;  
 $C_l$  — удельная молярная теплоемкость конденсирующейся фракции в жидким состоянии;  
 $T$  — абсолютная температура;  
 $R$  — постоянная совершенных газов;  
 $J$  — механический эквивалент теплоты;  
 $p$  — давление неконденсирующейся части при температуре  $T$ ;  
 $L$  — молярная теплота испарения конденсирующейся части при температуре  $T$ ;  
 $f$  — давление пара конденсирующейся части при температуре  $T$ .

С помощью формулы (4) были рассчитаны кривые давление — температура для обратимого адиабатного расширения газов организма (смесей), соответствующего высотам от 0 до 11 000 м через каждые 1000 м. Мы предполо-

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  $37^{\circ}$  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

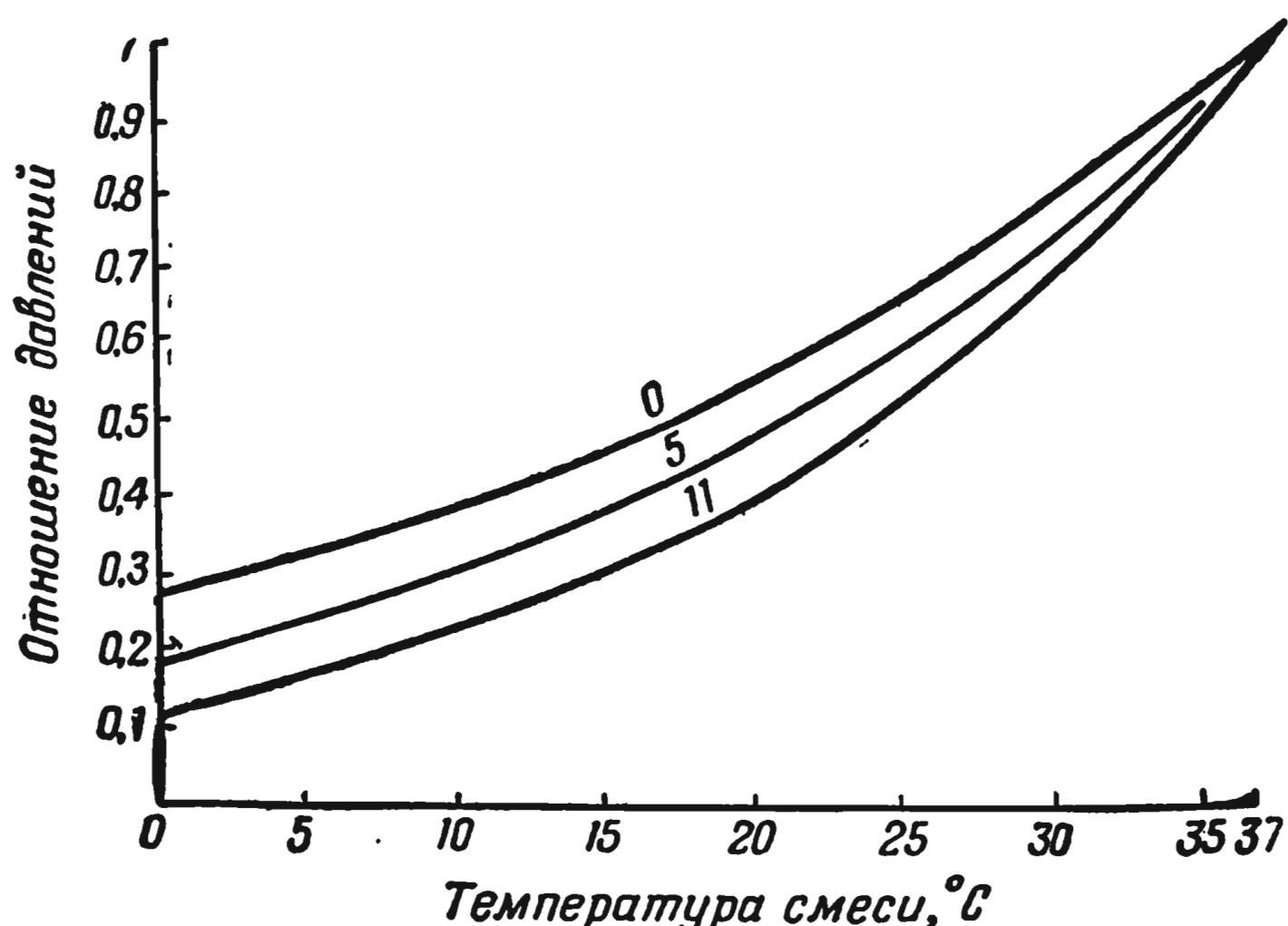


Рис. 3. Графики зависимости отношения давлений от температуры, рассчитанные по формуле Гульдберга и Моэна

Показаны кривые для начальных высот 0 м (кривая 0), 5000 м (кривая 5) и 11000 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).

Таблица 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<br>высота,<br>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

$$V = \frac{RT}{p}. \quad (5b)$$

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

расширения относительных объемов от температуры во время декомпрессии данной смеси.

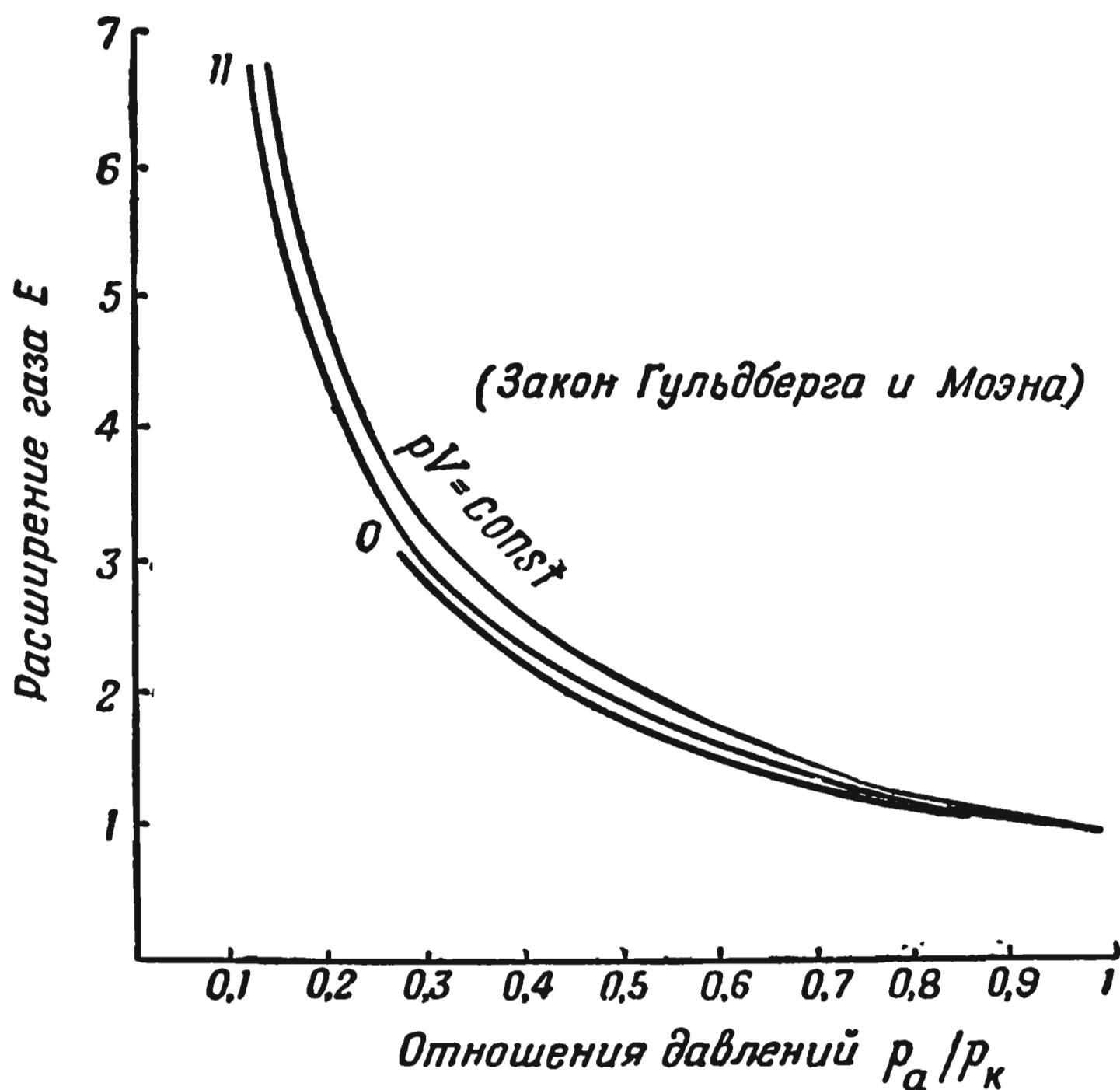
Таблица 5

**Зависимость относительных объемов от температуры, подсчитанная по формулам (4) и (5), для альвеолярного влажного газа, расширяющегося адиабатно, при начальных высотах от 0 до 11 000 м**

| Начальная высота, км | Температура, $^{\circ}\text{C}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      | 37                              | 35    | 30    | 25    | 20    | 15    | 10    | 5     | 0     |
| 0                    | 1                               | 1,061 | 1,236 | 1,435 | 1,670 | 1,936 | 2,254 | 2,584 | 2,995 |
| 1                    | 1                               | 1,066 | 1,248 | 1,461 | 1,718 | 2,015 | 2,371 | 2,745 | 3,214 |
| 2                    | 1                               | 1,069 | 1,261 | 1,488 | 1,768 | 2,092 | 2,487 | 2,921 | 3,467 |
| 3                    | 1                               | 1,072 | 1,274 | 1,516 | 1,818 | 2,170 | 2,601 | 3,110 | 3,731 |
| 4                    | 1                               | 1,075 | 1,287 | 1,545 | 1,868 | 2,255 | 2,733 | 3,310 | 4,040 |
| 5                    | 1                               | 1,078 | 1,300 | 1,573 | 1,919 | 2,345 | 2,871 | 3,504 | 4,360 |
| 6                    | 1                               | 1,081 | 1,312 | 1,601 | 1,969 | 2,438 | 3,023 | 3,721 | 4,735 |
| 7                    | 1                               | 1,084 | 1,324 | 1,629 | 2,020 | 2,518 | 3,159 | 3,950 | 5,155 |
| 8                    | 1                               | 1,087 | 1,337 | 1,657 | 2,072 | 2,602 | 3,308 | 4,171 | 5,470 |
| 9                    | 1                               | 1,089 | 1,349 | 1,684 | 2,124 | 2,693 | 3,458 | 4,396 | 5,795 |
| 10                   | 1                               | 1,091 | 1,361 | 1,710 | 2,173 | 2,781 | 3,594 | 4,620 | 6,150 |
| 11                   | 1                               | 1,093 | 1,373 | 1,735 | 2,234 | 2,886 | 3,772 | 4,874 | 6,621 |

Теперь, откладывая по оси абсцисс относительные давления, а по оси ординат — относительные объемы, соответствующие различным температурам смеси во время расширения последней, получим кривую давление — объем соответственно расширению данной смеси. Нами построен ряд кривых расширения смесей для начальных высот от 0 до 11 000 м через каждые 1000 м. Эти кривые позволяют весь-

ма просто определить относительное расширение, соответствующее данной декомпрессии и данной смеси. Отметим, что для начальных высот, расположенных между 0 и 11 000 м, эти кривые относительно близки и плохо



**Рис. 4.** Графики зависимости расширения газов, находящихся в закрытых полостях, от давления, рассчитанные по формуле Гульдберга и Моэна

Показаны кривые только для двух крайних высот: 0 м (кривая 0) и 11 000 м (кривая 11). Кривые остановлены на точке, где температура расширяющейся газовой смеси достигает 0°. Для сравнения приведена кривая изотермического расширения  $pV = \text{const} = RT$  для абсолютной температуры, соответствующей 37° С. Зная отношение  $\frac{p_a}{p_k}$ , можно с помощью кривой сразу найти величину расширения

отличаются одна от другой на общем графике. На рис. 4 показаны только две кривые давление — объем, соответствующие начальным высотам 0 и 11 000 м.

## Приближенный подсчет расширения и показателя политропы

Формула Гульдберга и Моэна может давать довольно точные результаты, требуя, однако, сложных и трудоемких расчетов, и приводит либо к построению графиков, имеющих неизбежно ограниченную точность, либо к подсчету показателя политропы. При этом для расширения одинаковой величины получают одни и те же значения относительного объема.

Но этот показатель оказывается не соответствующим ни закону реального расширения, ни даже весьма приближенному закону, в связи с тем что реальный показатель политропы изменяется в зависимости от абсолютной температуры.

Если изучить, пользуясь табл. 4 и 5, логарифмы относительных давлений  $\log p$  и относительных объемов  $\log V$ , соответствующих расширению данной смеси, то можно увидеть, что практически между ними существует почти линейная зависимость, а именно:

$$\log p = n \log V. \quad (6)$$

Это уравнение показывает, что расширение данной смеси следует приблизительно закону Лапласа:

$$pV^n = \text{const},$$

если брать точные или средние значения показателя политропы  $n$ , которые можно подсчитать с помощью формул термодинамики. Для расширения газовой смеси, содержащей компонент, способный к конденсации, показатель политропы имеет следующее значение [73]:

$$n_l = \frac{\left( C_p + \frac{N_e - N_V}{1 - N_e} C_l \right) (1 - N_V) + \frac{JL^2}{RT^2} N_V}{C_V + \frac{N_e - N_V}{1 - N_e} C_l + \frac{J}{R} \left( \frac{L}{T} - \frac{R}{J} \right)^2 N_V}, \quad (7)$$

где  $C_V$  — удельная молярная теплоемкость при постоянном объеме неконденсирующейся части;  
 $N_V$  — молярная часть конденсируемого компонента в состоянии пара.

С помощью этой формулы можно найти, что для газов внутренних полостей организма изменение  $n$ , составляет лишь сотую долю того расширения, которое может снизить температуру смеси от 37 до 0°. В этом же интервале темпе-

ратуры, который является практическим интервалом, можно рассматривать как очень точную формулу закона Лапласа

$$pV^n = \text{const},$$

в которой показатель  $n$  берется равным среднему значению  $n_i$ , подсчитанному для 0 и  $37^\circ$ , т. е.

$$n_{\text{ср}} = \frac{n_0 + n_{37}}{2}. \quad (8)$$

Подсчитанные с помощью формул (7) и (8) значения  $n_{\text{ср}}$  для различных высот сведены в табл. 6.

Таблица 6

**Средние показатели полигропы для влажного альвеолярного газа, расширяющегося адиабатно, для начальных высот от 0 до 11 000 м**

| Высота, км | $n_{\text{ср}}$ | Высота, км | $n_{\text{ср}}$ |
|------------|-----------------|------------|-----------------|
| 0          | 1,121           | 6          | 1,107           |
| 1          | 1,118           | 7          | 1,105           |
| 2          | 1,116           | 8          | 1,103           |
| 3          | 1,114           | 9          | 1,101           |
| 4          | 1,111           | 10         | 1,098           |
| 5          | 1,109           | 11         | 1,096           |

В этих условиях, очевидно, относительное расширение равно

$$E = \frac{V_{\text{кон}}}{V_{\text{нач}}} = \left( \frac{p_k}{p_a} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (9a)$$

Интересно сравнить значения относительного расширения  $E$ , приведенные в табл. 5, и значения  $E$ , подсчитанные для идентичных условий начальной высоты и отношения давлений с помощью формулы (9а) и табл. 6.

Мы сравнили крайние значения  $E$  для каждой высоты. Это сравнение показало, что формула (9а) дает для  $E$  результаты более высокие, в среднем на 2% (от 3,3% для расширения, начиная от 0 м, и до 1,2% для расширения, начиная с 11 000 м), что означает очень хорошее приближение.

Можно с достаточным для практики приближением использовать формулу (9а), взяв  $n=1,1$  (рис. 5); тогда

$$E = \frac{V_{\text{кон}}}{V_{\text{нач}}} = \left( \frac{p_k}{p_a} \right)^{0,909}. \quad (9б)$$

Аналогичное сравнение с предыдущей формулой показывает, что формула (9б) дает для  $E$  результаты тоже

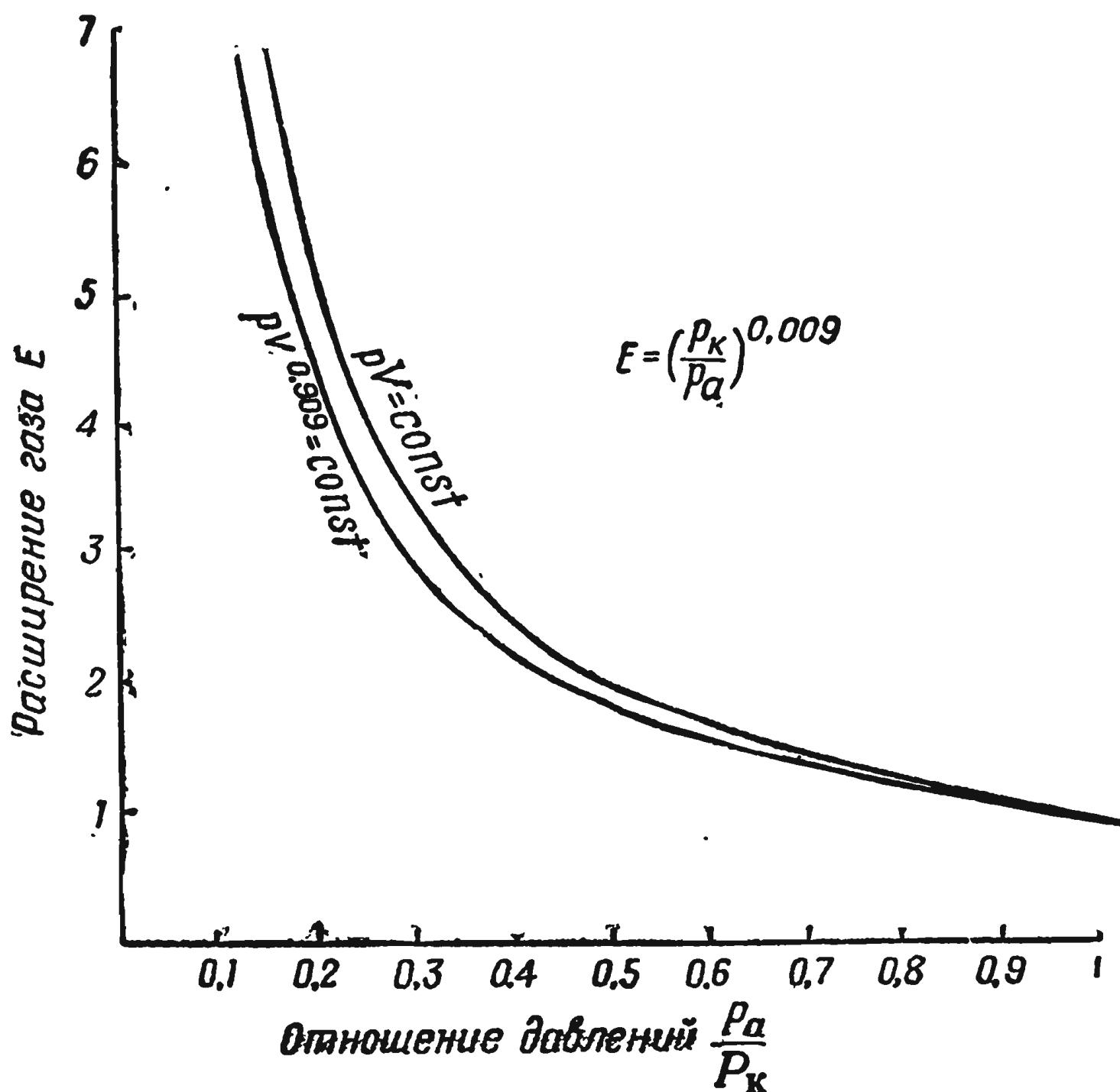


Рис. 5. Зависимость относительного расширения газа, содержащегося в закрытых полостях, от отношения давления согласно формуле  $E = \left( \frac{p_k}{p_a} \right)^{0,909}$

Видно, что при одной и той же величине  $\frac{p_a}{p_k}$  относительное расширение, подсчитанное по формуле (9б), всегда меньше изотермического расширения (кривая  $pV = \text{const}$ )

очень высокие (от 5,4% для расширения, начиная от 0 м, и до 0,57% для расширения, начиная от 11 000 м).

В заключение подчеркнем, что теоретические результаты очень близки к эмпирической формуле (2)  $E = \frac{p_k}{p_a}$ ,

предложенной Желфаном [34]. Следовательно, термодинамические расчеты дают результаты, весьма близкие к экспериментальным данным.

## Обсуждение

Мы предположили, что в случае быстрой декомпрессии и свободного расширения газов, находящихся в замкнутых полостях, теплообмен между газом и содержащим его органом отсутствует и расширение происходит по адиабатному закону. Оправдывается ли эта гипотеза на практике?

Кроме того, Фрайером [27] поставлен вопрос, достаточно ли принимать во внимание только углекислый газ (как это делали мы) или же еще необходимо учитывать и инверсию артериально-легочного градиента кислорода, наблюдавшуюся Луфтом [4, 61], как следствие некоторых взрывных декомпрессий.

Обсудим вначале последний вопрос.

Формулы (4) и (7) показывают значение удельной молярной теплоемкости либо при постоянном давлении  $C_p$ , либо при постоянном объеме  $C_V$  неконденсирующейся части смеси газов. Известно, что углекислый газ имеет удельную молярную теплоемкость, значительно большую, чем кислород и азот, которые образуют вместе с углекислым газом неконденсирующуюся часть смеси. Поэтому в смеси необходимо принимать во внимание часть углекислого газа, значение которой возрастает с увеличением начальной высоты. Напротив, нет необходимости принимать во внимание при очень быстрых декомпрессиях инверсию артериально-легочного градиента кислорода, ибо, как легко подсчитать, за несколько сотых долей секунды, в течение которых происходит декомпрессия, количество кислорода, выделяющегося из легких, ничтожно.

Вопрос о действительности адиабатного расширения при взрывной декомпрессии более сложен. Известно, что существуют три закрытых органа, наполненных влажным газом: легкие, желудочно-кишечный тракт и среднее ухо.

В случае желудочно-кишечного тракта и среднего уха, где поверхности теплообмена незначительны по отношению к объему заключенного в этих органах газа, теплообмен действительно может быть ничтожным.

Поверхность контакта легких с находящимся в них газом, напротив, очень велика по отношению к объему. Из-

вестно, что поверхность легких человека составляет около  $100 \text{ м}^2$  при объеме, равном приблизительно 3 л. Ясно, что такая поверхность теплообмена действительно весьма велика по отношению к объему. Известно также, что проходящий через легкие воздух в обычных условиях нагревается до  $37^\circ$  и полностью насыщается водяными парами во время своего нахождения в легких. Для человека весом в 70 кг число малых калорий, затрачиваемых на это нагревание в 1 сек, составляет приблизительно 4 кал.

Велико ли количество тепла, отдаваемого легкими расширяющемуся газу, и имеет ли оно значение при быстром разрежении?

Чтобы ответить на этот вопрос, надо подсчитать количество тепла, необходимого в каждый данный момент для того, чтобы расширение газа в легких было адиабатным при показателе политропы, равном 1,1.

Для практических целей мы подсчитаем количество тепла, необходимого в каждый данный момент для идентичного изотермического расширения газа в легких, величина которого имеет тот же порядок, что и при адиабатном расширении, но математическое выражение которого более простое и легче для преобразований и вычислений.

Известно, что при изотермическом расширении количество тепла  $dQ$ , сообщаемого расширяющемуся газу во время интервала  $dt$ , равно

$$dQ = \frac{1}{J} pdV, \quad (10a)$$

где  $J$  — механический эквивалент тепла.

Мы предполагаем уравнению (10а) эквивалентное выражение

$$dQ = \frac{1}{J} V dp, \quad (10b)$$

где  $V$  представляет собой объем легких, а не объем расширения, ибо газ, однажды выйдя из организма наружу, не получает больше тепла от легких. Уравнение (10б) можно написать и таким образом:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{J} V \frac{dp}{dt}. \quad (10b)$$

Раскрывая выражение  $\frac{dp}{dt}$  с помощью уравнений (3а), (3б) и (16) главы III, получаем

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{J} p_k S \cdot 0,9 \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{r^2}}, \quad (11)$$

где  $S$  — площадь отверстия голосовой щели в квадратных метрах;

$p_k$  — начальное давление.

Практически  $\frac{dQ}{dt}$  всегда довольно значительно по отношению к количеству тепла, которое могут отдать легкие в 1 сек, так как газ, содержащийся в легких, расширяется при декомпрессии с максимально возможной скоростью. Поэтому можно допустить, что в случае взрывной декомпрессии расширение газов, содержащихся в любых закрытых полостях, происходит адиабатно с показателем политропы, указанным в табл. 6.

Таким образом, можно сказать, что расширение газов в закрытых полостях во время взрывной декомпрессии правильно выражается не уравнением (1б), а формулой (9а). Это заключение вызывает необходимость пересмотра применимости формул, объясняющих различные стороны расширения и основанных на уравнении (1а).

\* \* \*

\*

В этой главе мы рассмотрели адиабатное расширение газов организма во время взрывной декомпрессии и провели расчет их показателей политропы. Мы уточнили, что присутствие пара (конденсирующийся компонент) придает этому расширению особый характер, на который мало обращали внимания до настоящего времени. При этом мы показали следующее.

1. Не существует простой формулы, позволяющей точно подсчитать элементы адиабатного расширения газов организма в зависимости от начального и конечного давления. Показатель политропы этих газов сильно меняется во время этого расширения. Однако между температурой и давлением газов, содержащих конденсирующийся элемент, при адиабатном расширении имеется весьма точная зависимость, известная как закон Гульдберга и Моэна. С помощью кривых давление — температура и закона Мариотта можно получить для этих газов соответствующие кривые объем — температура и давление — объем.

2. Для оценки относительного расширения газов, содержащих конденсирующийся элемент, можно пользоваться упрощенной формулой

$$E = \left( \frac{p_k}{p_a} \right)^{\frac{1}{n}},$$

где  $E = \frac{V_{\text{кон}}}{V_{\text{нач}}}$  — отношение конечного объема к начальному, называемое также относительным расширением;

$p_k$  — начальное давление в кабине;

$p_a$  — конечное давление в кабине;

$n$  — показатель политропы (для приблизительной оценки можно взять  $n=1,1$ ).

3. Гипотеза об адиабатном характере расширения действительна и для газов, находящихся в закрытых полостях всех органов, включая и легкие (для последних — при условии, что декомпрессия в кабине будет более быстрой, чем декомпрессия в легких).

4. Невозможно полностью принять выражение для относительного расширения, предложенное Лавлейсом и Гэге, а именно:

$$E = \frac{p_k - 47}{p_a - 47}.$$

То, что приемлемо для медленной декомпрессии, не может быть применено для выражения расширения в конце быстрой декомпрессии, ибо требует наличия постоянного насыщения водянымиарами. Как показали опыты Желфана и наши теоретические расчеты, осуществить это условие невозможно. Поэтому необходимо пересмотреть формулы, отражающие расширение газов организма и основанные на неточной формуле Лавлейса и Гэге.

---

---

## Г л а в а V

### ЗАКОН ДЕКОМПРЕССИИ В ЛЕГКИХ ПРИ ВЗРЫВНОЙ ДЕКОМПРЕССИИ

Значение закона декомпрессии в основном вытекает из влияния декомпрессии на организм. В самом деле, понижение давления влечет за собой расширение газов, находящихся в замкнутых полостях внутренних органов (кишечник) или в органах, сообщающихся с внешней средой через малое по отношению к объему органа отверстие (легкие, среднее ухо).

Для органов, имеющих замкнутые полости, расширение газов всегда приводит к увеличению объема, сопровождающемуся большим или меньшим повышением давления в зависимости от большей или меньшей возможности расширения органа. Это относится и к органам, которые, как например легкие, сообщаются с внешней средой.

Расширение содержащихся в органе газов может приводить к увеличению объема с возникновением избыточного давления или без повышения давления внутри такого закрытого органа, если скорость декомпрессии в кабине превышает максимальную скорость декомпрессии в рассматриваемом органе.

На основе исследований Хитчкока и его коллег [20, 84, 85] известно, что из всех расширений газов внутренних органов расширение газов в легких вызывает наиболее выраженные и значительные местные и общие действия. Если предположить в качестве условия, что при взрывной декомпрессии не происходит никакого расширения легких, то этим самым можно сразу исключить все основные повреждающие действия декомпрессии на организм.

Это приводит к необходимости исследования закона декомпрессии в легких и сравнения его с законом декомпрес-

ции в кабине, выраженным формулой (21а) в главе III. Такое сравнение позволит определить условия, ограничивающие коэффициент утечки  $\frac{S}{V}$  таким образом, чтобы скорость декомпрессии в кабине была в каждый момент меньше максимальной скорости декомпрессии в легких\*.

Это сравнение может привести к весьма простому результату, если окажется, что внутренние органы, сообщающиеся с внешней средой, вообще, и легкие, в частности, следуют закону декомпрессии, аналогичному закону декомпрессии в кабине. Чтобы изучить закон декомпрессии в легких, необходимо, следовательно, прежде всего зарегистрировать декомпрессию в легких и сделать математический анализ полученных записей. Но, так как и изучение декомпрессии в кабине не ставит другой проблемы, кроме проблемы точной регистрации, регистрация декомпрессии в легких является немногим более сложной.

### Трудности изучения декомпрессии в легких

Чтобы осуществить регистрацию и анализ декомпрессии в легких, необходимо создать в легких избыточное давление и затем произвести в них декомпрессию под постоянным внешним давлением. Единственное возможное для этих целей техника — это осуществить декомпрессию в кабине, более быструю, чем декомпрессия в легких, и изучить изменения давления в легких, начиная с момента окончания декомпрессии в кабине \*\*. Очевидно, что для этого достаточно просто зарегистрировать давление в легких во время взрывной декомпрессии и затем изучить интересующую часть кривой.

Но экспериментальное изучение показало, что давление в легких не может быть зарегистрировано прямым способом. В самом деле, всякая прямая регистрация давления

---

\* Найти такие условия невозможно, так как, если скорость декомпрессии в кабине будет меньше скорости декомпрессии в легких, истечение газа из легких и расширение последних прекратится.—*Прим. ред.*

\*\* В действительности декомпрессия в легких происходит не при постоянном, а при изменяющемся внешнем давлении, зависящем от декомпрессии в кабине. Поэтому вывод автора о полной идентичности законов декомпрессии в легких и в кабине верен только с момента окончания декомпрессии в кабине.—*Прим. ред.*

при помощи зонда \* или троакара \*\* дает сомнительные результаты, не соответствующие величине или интенсивности данного явления. Зонд или троакар во время декомпрессии может быть сдвинут или закрыт, что может вызвать повреждения органов и сделает невозможным дальнейшую точную регистрацию давления в легких во время конечной фазы, когда декомпрессия в кабине уже закончена и декомпрессия в легких происходит при постоянном внешнем давлении.

Мы искали возможность косвенной регистрации давления в легких и подошли к изучению внутригрудного внеплеврального давления, давления в полых венах, в легочной артерии и давления спинномозговой жидкости. Из этих упомянутых давлений три регистрируются внутри грудной клетки. Что касается давления спинномозговой жидкости, то давно известно его постоянное соотношение по форме и величине с внутрилегочным давлением. Мы надеялись путем регистрации различных давлений получить ценные сведения о внутрилегочном давлении — основном предмете нашей работы.

В результате 95 декомпрессий, выполненных на 33 собаках, мы получили 93 записи внутригрудного внеплеврального давления, 24 записи давления в полых венах, 43 записи давления в легочной артерии и 9 записей давления спинномозговой жидкости, зарегистрированных с точностью  $1/100$  сек.

Изучение участков кривых, соответствующих декомпрессии в легких при постоянном внешнем давлении (немедленно после конца декомпрессии в кабине), показало нам, что во всех случаях на кривой давления спинномозговой жидкости наблюдается дополнительное понижение, которое несколько реже встречается и на кривой давления в легочной артерии, когда декомпрессия совпадает с желудочковой диастолой \*\*\*.

Но амплитуда линии давления спинномозговой жидкости пропорциональна только изменению давления в легких,

---

\* Зонд — трубка, вводимая в полость органа (легкие, желудок и т. п.) для каких-либо исследований.— Прим. ред.

\*\* Троакар — тонкостенная металлическая трубка диаметром 2—5 мм с остроконечным сердечником, при помощи которого трубка вводится (путем прокола стенки) в ту или иную полость, например в брюшную или грудную, для откачивания жидкости при некоторых заболеваниях.— Прим. ред.

\*\*\* Желудочковая диастола — часть сердечного цикла, соответствующая расширению желудочков сердца.— Прим. ред.

как это недавно показал Гамильтон [44], тогда как изменение давления в легочной артерии связано с немедленным перемещением жидкости и потому весьма точно отражает изменение внутрилегочного давления. Эта артерия, глубоко расположенная в грудной полости, ведет себя как датчик легочного давления, который воспроизводит все детали с большой точностью, если не появляются дополнительные случайные колебания.

Сравнение кривых давления в легочной артерии с кривыми давления спинномозговой жидкости показывает, что во время желудочковой диастолы между ними наблюдается наибольшее сходство и что кривая давления в легочной артерии наиболее точно воспроизводит по форме и по величине изменение внутрилегочного давления. Напротив, на кривых венозного и внутригрудного давления видны добавочные посторонние колебания, вызванные неизбежными внешними влияниями (движения грудной клетки для внутригрудного внеплеврального давления; колебания, свойственные внутренней сосудистой системе, для давления в полых венах), которые маскируют основное явление, т. е. изменение внутрилегочного давления.

Таким образом, кривыми, отражающими легочное давление без помех и пригодными для математического анализа, можно считать только кривые давления в легочной артерии, соответствующие случаю совпадения декомпрессии с желудочковой диастолой. На рассмотрении этих кривых мы и остановимся.

### Закон декомпрессии в легких

Из 43 регистраций давления в легочной артерии во время взрывных декомпрессий мы смогли выбрать 11 кривых, которые соответствовали указанным выше условиям. Десять из этих кривых получены на нетрахеотомированных\* собаках и одна кривая — на трахеотомированной собаке.

Гиперболический анализ части кривой, соответствующей легочной декомпрессии при постоянном внешнем давлении (рис. 6), показывает, что у нетрахеотомированной собаки кривая зависимости  $\text{Arch} \frac{p}{p_a}$  от времени представлена двумя прямыми линиями.

\* Трахеотомия — перерезка трахеи («дыхательного горла») ниже голосовых связок.— Прим. ред.

В случае нетрахеотомированного животного общий режим истечения воздуха из легких получался такого же типа, какой соответствует уравнению (1а) в главе III. Этот режим можно записать в виде

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

откуда можно получить

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

где  $t_0$  — время декомпрессии в легких при данном режиме;

$p$  — давление в легких во время  $t$ ;

$p_a$  — внешнее давление;

$K$  — коэффициент декомпрессии, постоянный при данном режиме, при условии, что время  $t$  взято в определенных границах.

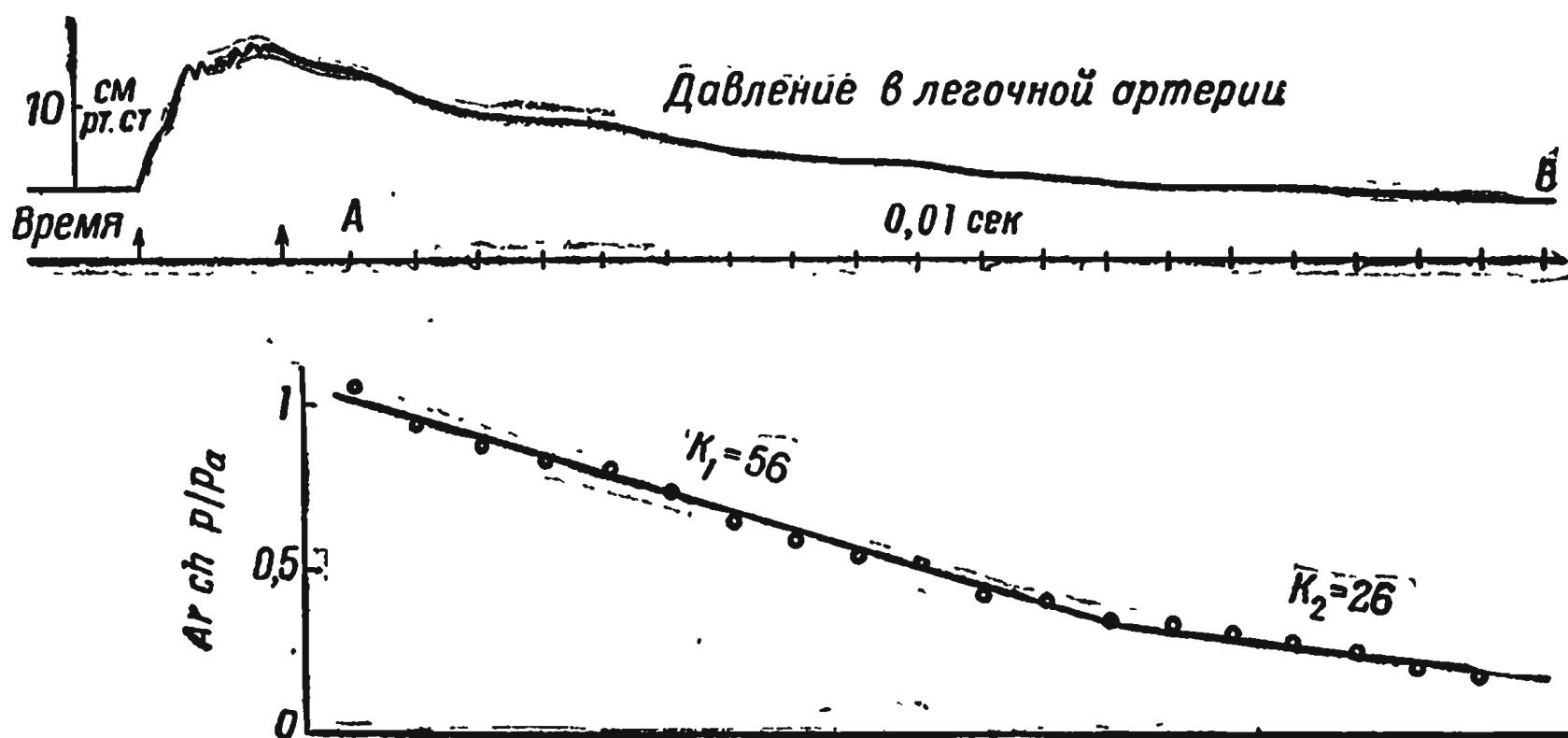


Рис. 6. Кривая легочной декомпрессии (опыт № 1) и ее гиперболический анализ

Вверху: кривая легочной декомпрессии; между двумя стрелками взрывная декомпрессия от давления 525 мм рт. ст. (3000 м) до давления 230 мм рт. ст. (9000 м)

Внизу: гиперболический анализ кривой легочной декомпрессии между точками  $A$  и  $B$ ; как видно из рисунка, кривая зависимости  $\operatorname{Ar ch} \frac{p}{p_a}$  от времени состоит из двух прямых линий

Итак, в уравнении (1а) имеется постоянный коэффициент  $K$ , математически аналогичный коэффициенту декомпрессии в уравнении (1б) главы III. Следовательно, этот коэффициент можно с достаточной точностью выразить формулой

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

где  $\rho_a$  — плотность газа в конечном состоянии;

$F$  — коэффициент истечения газа из легких (коэффициент утечки легких), т. е. отношение площади отверстия истечения  $S$  в квадратных метрах к объему легких  $V$  в кубических метрах.

Поскольку на основании экспериментов коэффициент  $F$  для данной декомпрессии является величиной постоянной, возникает вопрос, остаются ли при декомпрессии объем легких и площадь истечения постоянными или они пропорционально меняются. Для того чтобы уточнить это и тем самым определить возможность физической аналогии коэффициентов  $F$  в вышеприведенной формуле (2) и в уравнении (16) главы III, мы использовали киносъемку. Киносъемка с большой скоростью показала, что в наших опытах во время декомпрессии в легких при постоянном внешнем давлении грудная клетка и брюшная полость остаются неподвижными, причем грудная клетка находится в положении сильного вдоха. Следовательно, объем легких  $V$  во время декомпрессии в них можно считать практически постоянным. А так как  $K$  и  $V$  во время декомпрессии в легких постоянны, то и  $S$  будет постоянным. Таким образом, отношение  $\frac{S}{V}$  является математическим выражением коэффициента утечки легких, который физически полностью идентичен коэффициенту утечки кабины.

Итак, уравнения (1a) и (1б) можно связать с общим уравнением (21) главы III и написать

$$p = p_a \operatorname{ch} K_c \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} (t_0 - t). \quad (3)$$

Следовательно, коэффициенты утечки легких сравнимы с коэффициентами утечки кабины и закон (21) главы III одинаково объясняет декомпрессию в кабине и декомпрессию в легких.

Этот результат имеет большое практическое и теоретическое значение для изучения механизма выделения газа во время дыхания, что весьма важно для функционального исследования легких.

Однако между декомпрессией в легких и декомпрессией в кабине имеется существенное различие, обусловленное наличием двух последовательных коэффициентов утечки легких, а именно коэффициентов утечки трахеи и голосовой

щели, которые мы обозначим как первичный (соответствующий началу) и вторичный (соответствующий концу декомпрессии в легких).

Пользуясь нашими экспериментальными кривыми, мы определили (табл. 7) коэффициенты декомпрессии и подсчитали коэффициенты утечки с помощью формулы (2)

$$K = F \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} K_c = F \sqrt{\frac{p_k}{\rho_k}} R^{-\frac{n-1}{2n}} K_c, \quad (2)$$

где  $K_c = 0,9$  и  $n = 1,1$ ;

$p_k$  — начальное давление;

$\rho_k$  — начальная плотность газа;

$R$  — отношение  $\frac{p_k}{p_a}$ .

Таблица 7

Коэффициенты утечки  $F_1$  и голосовой щели  $F_2$ , подсчитанные с помощью кривых экспериментальных декомпрессий

| Номер опыта | Начальная высота, см | Конечная высота, см | Коэффициент декомпрессии трахеи ( $K_1$ ), $\text{сек}^{-1}$ | Коэффициент утечки трахеи ( $F_1$ ), $\text{м}^2/\text{м}^3$ | Коэффициент декомпрессии голосовой щели ( $K_2$ ), $\text{сек}^{-1}$                         | Коэффициент утечки голосовой щели ( $F_2$ ), $\text{м}^2/\text{м}^3$ | $v = K_c \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}}$ , м/сек |
|-------------|----------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1           | 3                    | 9                   | 5,6                                                          | 1/44,6                                                       | 2,6                                                                                          | 1/96,1                                                               | 249,8                                       |
| 2           | То же                | То же               | 3,7                                                          | 1/67,6                                                       | 2,1                                                                                          | 1/119                                                                | То же                                       |
| 3           | 6                    | 12                  | 3,3                                                          | 1/75,4                                                       | 2,5                                                                                          | 1/99,7                                                               | 249,05                                      |
| 4           | То же                | То же               | 3,1                                                          | 1/80,3                                                       | 2,4                                                                                          | 1/104                                                                | То же                                       |
| 5           | "                    | "                   | 5,75                                                         | 1/43,3                                                       | 3                                                                                            | 1/83                                                                 | "                                           |
| 6           | "                    | "                   | 4,1                                                          | 1/60,7                                                       | 2,2                                                                                          | 1/113                                                                | "                                           |
| 7           | 9                    | 15                  | 4,5                                                          | 1/55,2                                                       | 3,1                                                                                          | 1/80,2                                                               | 248,55                                      |
| 8           | То же                | То же               | 8,1                                                          | 1/30,7                                                       | 3,2                                                                                          | 1/77,7                                                               | То же                                       |
| 9           | "                    | "                   | 6,4                                                          | 1/38,8                                                       | 2,3                                                                                          | 1/108                                                                | "                                           |
| 10          | 3                    | 9                   | 5,9                                                          | 1/42,4                                                       | 3,4                                                                                          | 1/73,5                                                               | 249,8                                       |
|             |                      |                     | $K_3$                                                        | $F_3$                                                        | $K_3$ и $F_3$ — соответственно коэффициенты декомпрессии утечки после трахеотомии в опыте 10 |                                                                      |                                             |
| 11          | 3                    | 9                   | 7,6                                                          | 1/32,9                                                       |                                                                                              |                                                                      | 249,8                                       |

Средний  $F_1 = 1/49,4$ ; средний  $F_2 = 1/93,2$ .

Как видно из табл. 7, первичные коэффициенты изменяются от  $1/80,3$  до  $1/30,7 \text{ м}^2/\text{м}^3$  при среднем значении  $1/49,4 \text{ м}^2/\text{м}^3$  для десяти опытов. Вторичные коэффициенты меняются от  $1/119$  до  $1/73,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$  при среднем значении  $1/93,2 \text{ м}^2/\text{м}^3$  для десяти опытов. Эти коэффициенты широко меняются от одного животного к другому, причем первичный коэффициент приблизительно вдвое больше вторичного.

### Физиологический смысл двойного режима истечения газов

Каков же физиологический смысл двойного режима истечения газов?

Мы видели, что во время декомпрессии в легких объем легких остается практически постоянным. Поэтому изменение коэффициента утечки может быть связано только с изменением площади отверстия, через которое происходит истечение газа, или отверстия декомпрессии. Сравнение декомпрессии в легких у одного и того же животного до и после трахеотомии дает объяснение этого явления.

У одного животного до трахеотомии мы наблюдали двойной режим истечения с двумя последовательными коэффициентами: первичным, равным  $1/42,4 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , и вторичным, равным  $1/73,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . После трахеотомии у этого же животного коэффициент декомпрессии стал единственным и равным  $1/32,9 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Итак, трахеотомия, выключающая верхние дыхательные пути, ликвидирует двойной режим истечения газов из легких. Значит, выше места трахеотомии находится образование, которое и обусловливает этот двойной режим. Действительно, у нетрахеотомированного животного на уровне верхних дыхательных путей существует отверстие с переменной площадью. В начале декомпрессии в легких, когда разница давлений между легкими и внешней средой значительная, отверстие расширяется в силу его эластичности. При этом наблюдается первичный режим истечения. Когда разница давлений между легкими и внешней средой становится меньше, сила упругости, которая противодействует расширению, возвращает отверстие к прежним малым размерам, что приводит к вторичному режиму истечения. Поэтому вполне логично предположить, что органом, от которого в основном зависит это явление, является наиболее узкое место дыхательных путей, т. е. гортань, или, точнее, голосовая щель. Вторичный режим истечения и вторичный

коэффициент утечки представляют, собственно, режим и коэффициент голосовой щели.

Первичный коэффициент утечки нетрахеотомированного животного практически не отличается от единого коэффициента трахеотомированного животного. Первичный режим истечения и первичный коэффициент могут, следовательно, рассматриваться как трахеальные.

## ЗНАЧЕНИЕ ЗАКОНА ДЕКОМПРЕССИИ В ЛЕГКИХ ДЛЯ АВИАЦИИ

### Максимальный коэффициент утечки

Чтобы предупредить при декомпрессии возникновение в легких избыточного давления, достаточно иметь максимальный коэффициент утечки кабины меньше наименьшего коэффициента голосовой щели. Принимая коэффициент безопасности порядка 100%, получим

$$\frac{S}{V} = \frac{1}{200} \text{ } m^2/m^3.$$

Однако для отношения давлений, не превышающего 4, как показывает опыт, даже при использовании коэффициента утечки порядка трахеального коэффициента ( $1/50 \text{ } m^2/m^3$ ), создаваемое в легких весьма кратковременное избыточное давление, сопровождающее расширение, хорошо переносимо. Поэтому немецкие авторы, применяющие коэффициент  $1/41 \text{ } m^2/m^3$ , и физиологи Колумбийской лаборатории, применяющие коэффициент  $1/43 \text{ } m^2/m^3$ , никогда не наблюдали происшествий во время декомпрессии, отношение давлений которой не превышало 3,5.

Можно ли, следовательно, допустить, что практический предел переносимости декомпрессии определяется трахеальным коэффициентом? Желфэн [34] считает, что декомпрессии, проводимые на обезьяне, при коэффициенте утечки  $1/87 \text{ } m^2/m^3$  и отношении давлений, доходившем до 10, могут представлять опасность для легких.

Итак, заключение, что трахеальный коэффициент определяет практический предел переносимости, хотя и достаточно вероятно, но пока еще преждевременно. Ограничимся лишь указанием, что наряду с теоретически беспрепятственными отношениями давлений, которые допускает коэффициент утечки порядка  $1/200 \text{ } m^2/m^3$ , коэффициент утечки порядка трахеального коэффициента ( $1/50 \text{ } m^2/m^3$ ) позволяет

применять отношение давлений меньше 4. Это соответствует разности высот между кабиной и атмосферой от 8000 до 9000 м и может уже представлять достаточный интерес для авиационной практики.

## Применение закона декомпрессии для конструирования герметической кабины с наддувом

Полученные результаты непосредственно применимы при конструировании кабины с избыточным давлением. Они позволяют рассчитать максимально допустимую площадь иллюминаторов и остекления кабины, когда известны объем и степень наддува последней.

Известно, что наиболее частыми причинами случайных декомпрессий, связанных с нарушением герметичности кабин, являются обычно разрушения иллюминаторов или вообще остекления как относительно самых хрупких элементов. При этом надо учитывать, что иллюминатор пропадает или разбивается почти мгновенно.

Можно считать, что коэффициент максимальной случайной утечки  $F$  есть отношение поверхности иллюминатора (или остекления) к общему объему  $V$  кабины.

В этих условиях для отношения давления  $R = \frac{p_k}{p_a} > 4$  максимальная допустимая поверхность  $S$  иллюминатора в  $m^2$  при  $V$ , выраженным в  $m^3$ , должна быть

$$S \leq V \frac{1}{200} m^2.$$

Если  $R$  меньше 4, максимально допустимая поверхность иллюминатора будет

$$S \leq V \frac{1}{50} m^2.$$

Заметим, что недавние происшествия с самолетом «Комета», бросившие тень на гражданскую авиацию, никак нельзя приписать взрывной декомпрессии, как об этом говорили. Максимальный коэффициент утечки самолета «Комета» (отношение поверхности иллюминатора к объему кабины), меньше  $1/200 m^2/m^3$ , что делает безопасной всякую случайную декомпрессию.

## ДЕКОМПРЕССИЯ В СРЕДНЕМ УХЕ

Так же как и легкие, среднее ухо является закрытым органом, воздушная полость которого сообщается с глоткой через евстахиеву трубу. Проблемы декомпрессии, которые мы встречали при разборе декомпрессии в легких, появляются также и в случае среднего уха. Однако опыт многочисленных взрывных декомпрессий показывает, что не только никогда не бывало разрывов барабанной перепонки, но никогда не наблюдали избыточного давления внутри полости среднего уха. Поэтому безразлично, какой величины декомпрессию исследовать. Уточним это положение.

Известно, что среднее ухо, вообще говоря, имеет форму толстой двояковогнутой линзы, у которой одной поверхностью служит барабанская перепонка, являющаяся единственной перепончатой и деформируемой частью. Барабанская перепонка обладает собственной эластичностью и, кроме того, натянута цепью слуховых косточек, которые тянут ее внутрь полости и играют роль оттягивающей пружины. Общий объем полости мало меняется и может быть подсчитан. Среднее ухо, таким образом, представляет собой полость постоянного объема, сообщающуюся с атмосферой через евстахиеву трубу. Сечение последней на разных уровнях также хорошо известно.

Легко можно подсчитать, что коэффициент утечки среднего уха составляет приблизительно  $1/0,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Следовательно, среднее ухо безболезненно может подвергаться декомпрессии любой величины. Кроме того, как показали Маргария и Желфанд [11] в опытах на обезьянах, повышение давления до 30 мм рт. ст. уже достаточно, чтобы обеспечить открытие отверстия евстахиевой трубы. Надо надеяться, что такая декомпрессия не вызовет никаких повреждений.

Как мы уже видели, Бержере и Жиордан [5], Смит [67], Иви [53] и другие авторы почти постоянно находили у собак при взрывной декомпрессии кровоизлияние позади барабанной перепонки. Но это повреждение, как показали Маргария и Желфанд [11], не вызвано непосредственно повышением внутришного давления, и в этом смысле указанные авторы действительно могли утверждать, что взрывная декомпрессия не действует на среднее ухо. В дальнейшем мы увидим, что такое мнение не вполне точно.

\* \* \*

В этой главе, зная показатель политропы для расширения легочного газа и закон декомпрессии в кабине, мы изучили закон декомпрессии в легких.

Мы показали, что прямая регистрация внутрилегочного давления во время взрывной декомпрессии дает ненадежные результаты, но зато запись давления в легочной артерии точно отражает изменение внутрилегочного давления по форме и величине, в случае когда декомпрессия совпадает с желудочковой диастолой.

Анализируя записи декомпрессии в легких при постоянном внешнем давлении, мы показали, что в случае взрывной декомпрессии при конечном постоянном давлении, декомпрессия в кабине и декомпрессия в легких следуют одному и тому же закону:

$$p = p_a \operatorname{ch} K_c \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} (t_0 - t),$$

где  $t_0$  — время декомпрессии (в секундах), соответствующей коэффициенту декомпрессии  $K = K_c \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}}$ ;  
 $p$  — давление за время  $t$  в полости (кабина или легкие), в которой происходит декомпрессия;  
 $p_a$  — внешнее конечное давление;  
 $\rho_a$  — конечная плотность газа;  
 $\frac{S}{V}$  — эквивалент коэффициента утечки в  $m^2/m^3$ ;  
 $K_c$  — безразмерный эквивалент коэффициента сжатия.

Мы показали, что основная разница между декомпрессией в легких и декомпрессией в кабине обусловлена наличием двух коэффициентов последовательной утечки в случае легких. Наибольший из этих коэффициентов, равный  $1/50 \text{ } m^2/m^3$ , — это трахеальный коэффициент; меньший коэффициент, равный  $1/100 \text{ } m^2/m^3$ , — коэффициент голосовой щели.

Мы показали, что для предотвращения какого бы то ни было повышения давления внутри легких при взрывной декомпрессии достаточно обеспечить такие условия, при которых максимальный коэффициент утечки кабины будет меньше наименьшего коэффициента голосовой щели.

( $1/100 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ) или лучше (с учетом коэффициента безопасности 100%), если

$$F = \frac{S}{V} = \frac{1}{200} \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Однако для отношений давлений, не превышающих 4, как показывает опыт, можно использовать коэффициент утечки порядка трахеального коэффициента ( $1/50 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ). Создающееся при этом во время декомпрессии повышенное давление, вызванное расширением газа, очень кратковременно и достаточно хорошо переносимо.

Наши результаты непосредственно применимы для конструирования самолетов и позволяют, зная объем кабины и степень ее наддува, подсчитать поверхность иллюминатора и смотровых окон, обеспечивающую безопасность при взрывных декомпрессиях.

Декомпрессия в среднем ухе не ставит никакой особой дополнительной проблемы в связи с весьма высоким коэффициентом утечки среднего уха, равным у человека приблизительно  $1/0,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Поэтому среднее ухо практически может перенести любую декомпрессию

---

---

## Г л а в а VI

# ДАВЛЕНИЕ В ЛЕГКИХ ВО ВРЕМЯ ВЗРЫВНОЙ ДЕКОМПРЕССИИ

Как мы только что показали, для предотвращения возникновения при взрывной декомпрессии избыточного давления в легких и связанных с этим нежелательных последствий необходимо, чтобы декомпрессия в кабине происходила всегда медленнее, чем декомпрессия в легких.

Если же величины соответствующих коэффициентов утечки обусловливают в кабине более быструю декомпрессию, чем декомпрессия в легких, то для предотвращения возникновения слишком большого избыточного внутрилегочного давления необходимо идти по пути уменьшения отношения давлений. Здесь возможны следующие два механизма.

1. Можно предположить, как это сделали Свиней и Гэге и немецкие авторы [4], что расширение легких при декомпрессии происходит немедленно, что исключает возникновение в них какого-либо избыточного давления. Эти авторы считают, что избыточное давление в полости легких может установиться только тогда, когда последние расширяются до предела. Если эта гипотеза верна, то величина избыточного давления является функцией дыхательного положения легких в момент декомпрессии, причем наибольшее расширение возможно в случае, когда легкие близки к положению максимального выдоха.

2. Но можно также предположить, что грудная клетка обладает некоторой инертностью и что ее расширение только с некоторым опозданием ограничивает возникновение избыточного внутрилегочного давления. В этом случае будет наблюдаться непостоянное избыточное давление, не связанное с тем давлением, которое может быть подсчитано в соответствии с предшествующей гипотезой.

Реальный механизм может быть найден только при изучении экспериментальных данных, в качестве которых могут быть в основном использованы:

1) регистрация грудобрюшного расширения при помощи киносъемки с большой скоростью;

2) вычисление изменения внутрилегочного давления по данным записи давления в легочной артерии и давления спинномозговой жидкости.

Чтобы изучить характер и величину грудобрюшного расширения, можно использовать киносъемку. Мы видели, что в настоящее время невозможно произвести достаточно надежную и точную прямую регистрацию расширения грудной клетки, происходящего за время порядка  $\frac{1}{100}$  сек. Поэтому мы должны довольствоваться, хотя и грубыми, но зато надежными результатами, используя киносъемку, расширения грудобрюшной области собаки во время взрывной декомпрессии со скоростью 3000 кадров в секунду.

Записи давления в легочной артерии и давления спинномозговой жидкости более точны. Но их истолкование для определения внутригрудного расширения более трудное, так как они не отражают непосредственно характер расширения грудной клетки. Чтобы изучить эти кривые, необходимо знать общий закон, которому подчиняется внутрилегочное давление при изменении внешнего давления и объема легких, и сравнить получаемые записи с тем, что позволяет предвидеть теория.

Мы последовательно изучим результаты, полученные при помощи киносъемки грудобрюшной области с большой скоростью, и указанные кривые артериального давления и давления спинномозговой жидкости.

### Результаты киносъемки с большой скоростью

Для декомпрессии, характеризующейся коэффициентом утечки  $\frac{1}{3,24} \text{ м}^2/\text{м}^3$  и отношением давлений 2,3 (при общем времени декомпрессии  $\frac{2}{100}$  сек), киносъемка со скоростью 3000 кадров в секунду дает следующие результаты.

1. Во время первой сотой доли секунды грудная клетка и брюшная стенка практически остаются неподвижными.

2. Начиная со второй сотой доли секунды, грудная клетка прогрессивно увеличивается в объеме, достигая положения сильного вдоха, и сохраняет это положение в течение всего времени декомпрессии в легких при постоянном

внешнем давлении, как мы это видели в главе V. Передняя брюшная стенка тоже перемещается соответственно раздуванию брюшной полости, но это явление более трудное для точного определения.

Вообще результаты киносъемки с большой скоростью достаточно четко показывают расширение грудной клетки, однако они недостаточны, чтобы можно было сделать вывод об общем расширении полости легких. Общее расширение легких — это алгебраическая сумма расширения грудной клетки за счет движения ребер и увеличения полости груди за счет опущения диафрагмы. Хотя киносъемка с большой скоростью позволяет уточнить характер расширения грудной клетки за счет движения ребер с достаточной точностью, величина расширения легких, связанная с опущением диафрагмы, не поддается этому методу исследования.

Таким образом, единственной возможной остается методика, основанная на косвенной регистрации внутрилегочного давления и сравнении действительных записей с теоретическими кривыми, полученными из закона декомпрессии.

Поэтому, чтобы иметь возможность истолковать реальные записи давления, мы должны сначала установить теоретические законы изменения внутрилегочного давления в различных случаях.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРИЛЕГОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

### Абсолютное и избыточное давления в легких

Напомним, что зарегистрированные в наших опытах кривые изменения давления в легких являются в действительности кривыми избыточного давления, ибо мы использовали дифференциальный датчик, который показывал давление в легких относительно внешнего давления. Но это не вызывает никаких затруднений, так как внешнее давление в наших опытах оставалось всегда постоянным. Труднее зарегистрировать давление в легких, когда внешнее давление меняется, как во время декомпрессии кабины. Абсолютное и избыточное давления в легких отличаются тогда на изменяющуюся величину  $p_m$  — мгновенное переменное давление в кабине, и формы кривых абсолютного и избыточного давлений могут быть весьма различными.

Итак, с одной стороны, в легких имеется избыточное по отношению к внешнему давлению, которое наиболее важно для физиолога, но трудно для измерения, а с другой стороны — абсолютное давление, которое можно достаточно легко определить. Но тогда очевидно, что при постоянном внешнем давлении нет основания настаивать на различии между абсолютным давлением и избыточным, ибо они во время декомпрессии отличаются друг от друга на постоянную величину. Необходимо только помнить, что, говоря об абсолютном давлении, подразумевают давление, которое определяется абсолютным манометром, а говоря об избыточном давлении в легких, подразумевают давление, измеряемое по отношению к меняющемуся внешнему давлению.

### Теоретическое изучение изменения давления внутри легких

Пользуясь законом декомпрессии, можно рассчитать и предсказать изменение внутрилегочного давления. Но дифференциальное уравнение, решение которого дает абсолютное давление, допускает применение предельных интегралов только тогда, когда внешнее давление остается постоянным. В остальных случаях решение дифференциального уравнения может быть выполнено только графически, да и то только в некоторых частных случаях.

Следовательно, внутрилегочное давление — конечный предмет нашего изучения — может быть получено с максимальной точностью только графическим путем и прежде всего при помощи кривой абсолютного давления в легких. Тем не менее будет возможно, как мы это уже установили, использовать для подсчета избыточного давления приблизительную формулу, позволяющую рассчитывать это давление с достаточной для практики точностью.

Прежде всего, подсчитаем абсолютное внутрилегочное давление. Из общей формулы истечения газа можно написать, что при истечении газа из легких через отверстие площадью  $S$  со скоростью  $v$  содержащаяся в легких масса газа  $\rho V$  ( $V$  — объем легкого,  $\rho$  — плотность газа) в каждый момент меняется, причем меняется не только объем газа, но и его плотность, т. е.

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = S \rho v. \quad (1)$$

Это уравнение аналогично уравнению (8) главы III с той только разницей, что  $V$  является тоже функцией времени  $t$ . Отсюда получим уравнение

$$V \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{dV}{dt} = S\rho v. \quad (2)$$

Изучим при помощи этого уравнения наиболее интересные случаи интерпретации кривых внутрилегочного давления.

Случай 1.  $v = 0$ .

Когда  $v=0$ , легкое увеличивается в объеме без сопротивления и никакого истечения газа не происходит. При этом внутрилегочное давление в каждый момент равно внешнему давлению. Избыточное давление в легких незначительно, и кривая внутрилегочного давления в зависимости от времени будет почти параллельна оси времени при ординате 0.

Случай 2.  $V_m = V_0 = \text{const}$ .

При этих условиях уравнение (2) будет иметь вид:

$$\frac{V_0 d\rho}{dt} = S\rho v. \quad (3)$$

Таким образом, мы подошли к вопросу истечения газа из легких при постоянном объеме. В главе V мы рассмотрели случай истечения газа из легких при постоянном объеме и постоянном конечном давлении и получили для него уравнение (3). Но в случае когда внешнее давление  $p_m$  меняется, как во время декомпрессии в кабине, уравнение (3) должно быть выражено в дифференциальной форме, т. е.

$$\frac{dp_{\text{абс}}}{dt} = K_c \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_m}{\rho_m}} \sqrt{p_{\text{абс}}^2 - p_m^2}, \quad (4)$$

где  $p_{\text{абс}}$  — мгновенное абсолютное давление в легких;

$p_m$  — давление в кабине, изменяющееся во времени;

$\rho_m$  — плотность газа, расширяющегося в легких при давлении  $p_m$ .

Это уравнение нельзя решить интегрированием, но оно может быть решено графически для наших экспериментальных условий. Мы взяли коэффициент утечки кабины равным  $1/3,24 \text{ м}^2/\text{м}^3$  и коэффициент утечки легких  $\frac{S}{V} = \frac{1}{33} \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Эта величина составляет  $2/3$  от среднего коэффициента утечки трахеи ( $1/49,4 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ). Мы взяли эти величины, предполагая, что при постоянном легочном объеме:

1) средний легочный объем равен  $\frac{2}{3}$  максимального легочного объема, а значит коэффициент утечки легких будет равен  $\frac{2}{3}$  среднего коэффициента утечки трахеи;

2) голосовая щель увеличивается без опоздания, что обеспечивает немедленное максимальное истечение газа из легких. Подчеркнем, что эта последняя гипотеза не соот-

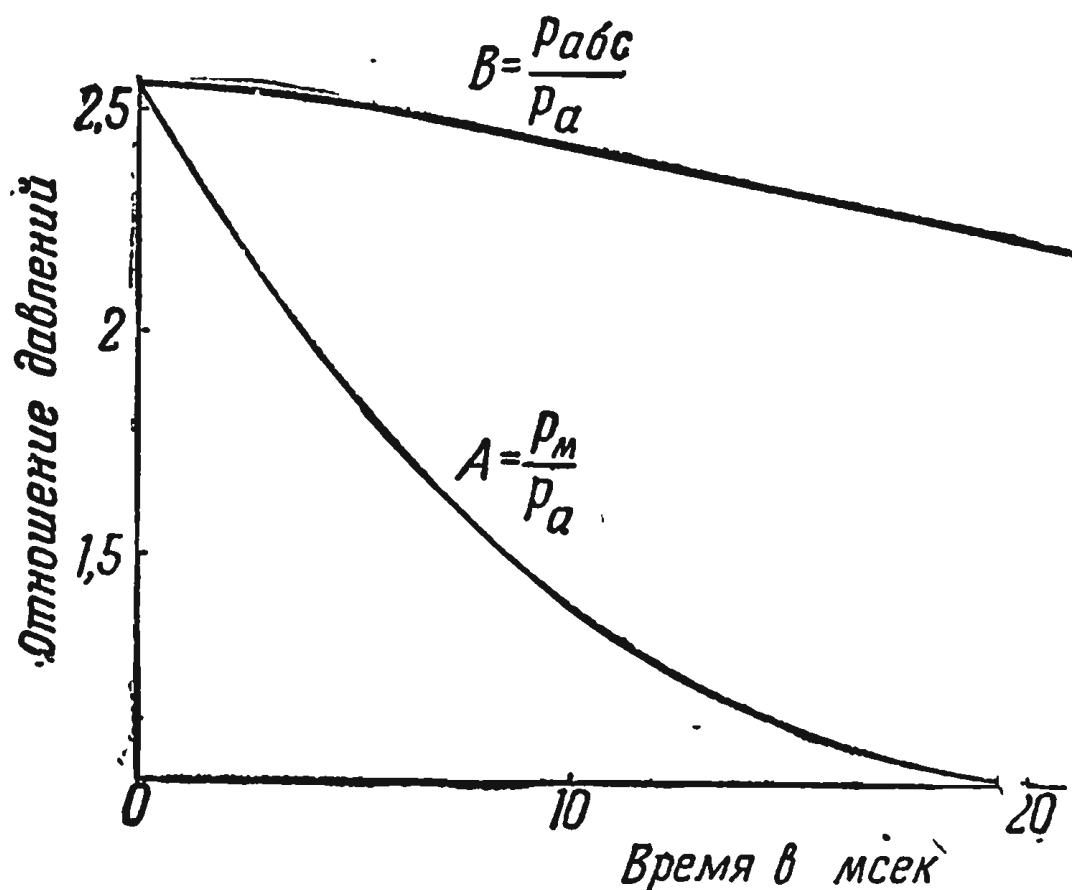


Рис. 7.  $A$  — кривая декомпрессии в кабине при коэффициенте утечки  $\frac{S}{V} =$

$= \frac{1}{3,24} \text{ м}^2/\text{м}^3$  для отношения давлений  $R = 2,555$  и для газа с показателем политропы  $n = 1,29$

$B$  — кривая относительного давления в легких при постоянном коэффициенте утечки  $\frac{S}{V} = \frac{1}{33} \text{ м}^2/\text{м}^3$  для декомпрессии, представленной кривой  $A$ . Кривая получена интегрированием уравнения (4) методом „изоклинов“

ветствует действительности, но при незнании закона расширения голосовой щели логично опираться на более неблагоприятный случай, допуская создание избыточного давления в легких.

Пользуясь методом графического интегрирования (метод «изоклинов»), мы подсчитали теоретическое абсолютное и относительное давления в полости легких при постоянном коэффициенте утечки  $\frac{S}{V}$ , равном  $\frac{1}{33} \text{ м}^2/\text{м}^3$ , во время декомпрессии в кабине при начальном отношении давлений

$R = 2,555$ , соответствующем разности высот от 9000 до 15 000 м, и при продолжительности декомпрессии  $t_0 = 0,022$  сек (рис. 7).

Процентное отношение абсолютного давления в легких  $p_{\text{абс}}$  к начальному давлению  $p_k$  (табл. 8) показывает, что абсолютное легочное давление незначительно снижается во время декомпрессии, особенно в первые десять миллисекунд. Это дает возможность произвести приблизительную оценку, интересную для подсчета внутрилегочного избыточного давления.

Таблица 8

**Относительные давления  $r$  и  $M$  в случае декомпрессии в кабине при коэффициенте утечки  $F = 1/3,24 \text{ м}^2/\text{м}^3$  для начального отношения давлений  $R = 2,555$  (декомпрессия эквивалентна отношению высот  $9000/15000$  м)**

Средний коэффициент утечки трахеи принят равным  $1/33 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Начальные газовые постоянные легочного или альвеолярного воздуха взяты для высоты 9000 м.

| Время от начала декомпрессии, мсек | $r = \frac{p_{\text{абс}}}{p_a}$ | $M = \frac{p_{\text{абс}}}{p_k}, \%$ | Время от начала декомпрессии, мсек | $r = \frac{p_{\text{абс}}}{p_a}$ | $M = \frac{p_{\text{абс}}}{p_k}, \%$ |
|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| 0                                  | 2,555                            | 100                                  | 12                                 | 2,403                            | 94                                   |
| 1                                  | 2,549                            | 99,7                                 | 14                                 | 2,370                            | 92,7                                 |
| 2                                  | 2,542                            | 99,5                                 | 16                                 | 2,336                            | 91,4                                 |
| 4                                  | 2,522                            | 98,7                                 | 18                                 | 2,303                            | 90,1                                 |
| 6                                  | 2,496                            | 97,6                                 | 20                                 | 2,269                            | 88,8                                 |
| 8                                  | 2,467                            | 96,5                                 | 22                                 | 2,236                            | 87,5                                 |
| 10                                 | 2,436                            | 95,3                                 |                                    |                                  |                                      |

### Приблизительный подсчет избыточного внутрилегочного давления

Из уравнения (4) теоретическая величина избыточного внутрилегочного давления  $p_{\text{абс}} - p_m$ , очевидно, равна

$$p_{\text{абс}} - p_m = \int_{p_k}^{p_a} \frac{dp_{\text{абс}}}{dt} - p_m, \quad (5)$$

где  $p_{\text{абс}}$  — мгновенное абсолютное внутрилегочное давление;

$p_m$  — мгновенное давление в кабине,

В экспериментальных условиях можно с достаточной точностью пользоваться уравнением

$$p_{\text{абс}} - p_m = p_k - p_m = p_k - p_a \operatorname{ch} K_c \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}} (t_0 - t), \quad (6)$$

которое весьма близко к уравнению (5), особенно при значении  $t$ , близком к 0, и очень точно для  $t < 0,008$  сек. В изученном случае, когда  $t = 0,008$  сек, теоретическая кривая, выраженная уравнением (6), может быть легко найдена. Она симметрична кривой декомпрессии в кабине в зависимости от времени относительно оси, параллельной оси абсцисс (оси времени) и имеющей ординату  $\frac{p_k - p_a}{2}$ . Теперь можно сравнить теоретические и экспериментальные кривые.

### Принцип сравнения экспериментальных кривых избыточного внутрилегочного давления с теоретическими

Сравнение экспериментальных кривых избыточного внутрилегочного давления с теоретическими кривыми для случаев расширения легких без сопротивления и отсутствия расширения легких позволяет сделать следующие выводы.

1. Если в начальный период декомпрессии кривая избыточного внутрилегочного давления идет параллельно оси абсцисс (оси времени) и имеет незначительную ординату, то в отрезок времени, ограниченный этой параллелью, легкие расширяются без сопротивления.

2. Если, напротив, кривая избыточного давления приближается к уравнению (6), расширение легких незначительно.

Зная эти идеальные случаи, можно отметить, что если экспериментальная кривая избыточного внутрилегочного давления располагается между осью времени и кривой, представленной уравнением (6), то имеет место частичное расширение легких, которое отстает от декомпрессии. Если же экспериментальная кривая пойдет выше кривой, соответствующей уравнению (6), то это означало бы, что имеет место отрицательное расширение, т. е. уменьшение объема грудной полости.

# СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ ИЗБЫТОЧНОГО ВНУТРИЛЕГОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ

## Используемая техника

Как было указано в главе V, кривая внутрилегочного давления лучше всего совпадает с записью давления в легочной артерии, особенно во время желудочковой диастолы. Однако получение диастолических кривых для изучения избыточного давления не обязательно, так как собственная частота и амплитуда колебаний системы легочных сосудов, составляющие соответственно несколько сотых секунды и несколько сантиметров рт. ст., не могут заметно отразиться на изучаемом явлении, имеющем малую продолжительность (менее 0,01 сек) и значительную амплитуду (десятки сантиметров рт. ст.).

Из 43 записей давления в легочной артерии нами было использовано 32, так как при 11 записях скорость протяжки фотобумаги (40 см/сек) оказалась недостаточной для точного измерения явлений, происходящих в тысячные доли секунды. Для каждой из этих 32 записей была получена кривая, соответствующая уравнению (6), т. е.  $p_k - p_m$ . Чтобы облегчить сравнение, в каждой записи в качестве исходной бралась точка, соответствующая началу декомпрессии (точка  $O$ ), а масштабы давления и времени были одинаковы для всех кривых.

## Результаты

Анализ 32 записей давления в легочной артерии, соответствующих декомпрессиям при отношениях давлений от 1,685 до 3,93, привел к следующим результатам (табл. 9).

1. За время между точками  $O$  и  $E$  кривая избыточного давления в легких в зависимости от времени практически следует закону, выраженному уравнением (6).

2. Начиная с точки  $E$ , экспериментальная кривая отклоняется от закона (6), прогрессивно приближаясь к оси времени.

3. Интервал времени, разделяющий точки  $O$  и  $E$ , является постоянным и равным 7,5 мсек ( $7,45 \pm 0,3$ ).

4. Если, приняв точку  $O$  за исходную, измерить избыточное давление в точке  $E$  и сравнить его с давлением, подсчитанным по уравнению (6), то оказывается, что точность этого закона составляет 85%.

Сравнение величин избыточного давления, подсчитанных по формуле (6), и реальных величин  
внутрилегочного давления в точках  $E$  и  $E'$

| $\frac{\Delta P}{\text{мм рт. ст.}}$ | Oberfläche (A)<br>мм<br>БИОКОРТА, мк | Hautfläche<br>мм<br>БИОКОРТА, мк | Körperhaut<br>мм<br>БИОКОРТА, мк | Blema от 0 до E'<br>(t $E'$ ),<br>мсек | Время от 0 до E'<br>(t $E'$ ),<br>мсек | Теорети-<br>ческое<br>избыточное<br>давление<br>в точке E<br>(P $E_T$ ),<br>см рт. ст. | Реаль-<br>ное<br>избыточное<br>внутри-<br>легочное<br>давление<br>в точке E<br>(P $E_p$ ),<br>см рт. ст. | $r_1 = \frac{P_{E_p}}{P_{E_T}}, \%$                                                                   |                                                                                                       | $r_2 = \frac{P_{E'p}}{P_{E'T}}, \%$                                                                   |                                                                                                       |
|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                      |                                      |                                  |                                  |                                        |                                        |                                                                                        |                                                                                                          | Реально-<br>е избыточное<br>внутри-<br>грудное<br>давление<br>в точке E'<br>(P $E'p$ ),<br>см рт. ст. | Реально-<br>е избыточное<br>внутри-<br>легочное<br>давление<br>в точке E<br>(P $E_p$ ),<br>см рт. ст. | Реально-<br>е избыточное<br>внутри-<br>грудное<br>давление<br>в точке E'<br>(P $E'p$ ),<br>см рт. ст. | Реально-<br>е избыточное<br>внутри-<br>грудное<br>давление<br>в точке E'<br>(P $E'p$ ),<br>см рт. ст. |
| 1                                    | 1,635                                | 2                                | 6                                | 7,4                                    |                                        | 19,1                                                                                   | 17,2                                                                                                     | 11,2                                                                                                  | 90                                                                                                    | 58,5                                                                                                  |                                                                                                       |
| 2                                    | То же                                | То же                            | 7                                | 7                                      |                                        | 19,7                                                                                   | 18                                                                                                       | 13,6                                                                                                  | 91,5                                                                                                  | 69                                                                                                    |                                                                                                       |
| 3                                    | "                                    | "                                | 7                                | 7,4                                    |                                        | 19,7                                                                                   | 18                                                                                                       | 14                                                                                                    | 91,5                                                                                                  | 71                                                                                                    |                                                                                                       |
| 4                                    | 1,905                                | 1                                | "                                | "                                      |                                        | 21,5                                                                                   | 20                                                                                                       | 14                                                                                                    | 93                                                                                                    | 65                                                                                                    |                                                                                                       |
| 5                                    | То же                                | То же                            | "                                | "                                      |                                        | 20,7                                                                                   | 20,4                                                                                                     | 17,2                                                                                                  | 98                                                                                                    | 83                                                                                                    |                                                                                                       |
| 6                                    | "                                    | "                                | "                                | "                                      |                                        | 21,3                                                                                   | 21,2                                                                                                     | 17,2                                                                                                  | 99,5                                                                                                  | 80,5                                                                                                  |                                                                                                       |
| 7                                    | "                                    | "                                | "                                | "                                      |                                        | 21,2                                                                                   | 18                                                                                                       | 13,2                                                                                                  | 85                                                                                                    | 62                                                                                                    |                                                                                                       |
| 8                                    | "                                    | "                                | "                                | "                                      |                                        | 21,2                                                                                   | 20                                                                                                       | 14                                                                                                    | 94                                                                                                    | 66                                                                                                    |                                                                                                       |
| 9                                    | "                                    | "                                | "                                | "                                      |                                        | 21,5                                                                                   | 19,6                                                                                                     | 12                                                                                                    | 91                                                                                                    | 56                                                                                                    |                                                                                                       |
| 10                                   | "                                    | "                                | "                                | "                                      |                                        | 20,7                                                                                   | 17,6                                                                                                     | 12,8                                                                                                  | 85                                                                                                    | 62                                                                                                    |                                                                                                       |
| 11                                   | "                                    | "                                | "                                | "                                      |                                        | 7                                                                                      | 22,7                                                                                                     | 14,8                                                                                                  | 14                                                                                                    | 65                                                                                                    |                                                                                                       |
| 12                                   | 2,129                                | 7                                | 12                               | 7,9                                    |                                        | 8                                                                                      | 10,6                                                                                                     | 8,4                                                                                                   | 8,6                                                                                                   | 79                                                                                                    | 81                                                                                                    |
| 13                                   | 2,286                                | 3                                | 9                                | 7,1                                    |                                        | 7,3                                                                                    | 17,1                                                                                                     | 16,4                                                                                                  | 13,2                                                                                                  | 96                                                                                                    | 75,5                                                                                                  |
| 14                                   | То же                                | То же                            | 7,4                              | "                                      |                                        | 7,4                                                                                    | 17,6                                                                                                     | 12,8                                                                                                  | 95,5                                                                                                  | 72,5                                                                                                  |                                                                                                       |

*Продолжение*

| %  | Optima<br>Grenzmenge<br>(R) | Hauptspannung<br>Bewerks, кн | Kohärenzspannung<br>Bewerks, кн | Bemerkung<br>O zu E | Bemerkung<br>O' zu E'<br>(t <sub>E'</sub> ),<br>мсек | Теорети-<br>ческое<br>избыточное<br>давление<br>в точке E<br>(P <sub>E'T</sub> ),<br>см рт. ст. | Реальное<br>избыточное<br>внутри-<br>легочное<br>давление<br>в точке E'<br>(P <sub>E'T'</sub> )<br>см рт. ст. | Реальное<br>избыточное<br>внутри-<br>грудное<br>давление<br>в точке E'<br>(P <sub>E'p</sub> ),<br>см рт. ст. | $r_1 = \frac{P_{E'T}}{P_{E'T'}}$ ,<br>% | $r_2 = \frac{P_{E'p}}{P_{E'T'}}$ ,<br>% |
|----|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
|    |                             |                              |                                 |                     |                                                      |                                                                                                 |                                                                                                               |                                                                                                              |                                         |                                         |
| 15 | 2,286                       | 3                            | 9                               | To же               | 7,5                                                  | 7,75                                                                                            | 17,8                                                                                                          | 18,2                                                                                                         | 15,6                                    | 12,4                                    |
| 16 | To же                       | "                            | "                               | To же               | 7,5                                                  | 7,7                                                                                             | 17,8                                                                                                          | 18,1                                                                                                         | 15,6                                    | 12,4                                    |
| 17 | "                           | "                            | "                               | "                   | 7,5                                                  | 7,7                                                                                             | 17,8                                                                                                          | 18,1                                                                                                         | 18                                      | 12                                      |
| 18 | "                           | "                            | "                               | "                   | 7,5                                                  | 7,8                                                                                             | 17,8                                                                                                          | 18,1                                                                                                         | 14,4                                    | 12                                      |
| 19 | "                           | "                            | "                               | "                   | 7,5                                                  | 7,8                                                                                             | 17,8                                                                                                          | 18,1                                                                                                         | 14,8                                    | 12                                      |
| 20 | 2,445                       | 6                            | 12                              | To же               | 7,8                                                  | 7,5                                                                                             | 12,4                                                                                                          | 12,4                                                                                                         | 11,4                                    | 9,6                                     |
| 21 | To же                       | "                            | "                               | To же               | 7,8                                                  | 7,5                                                                                             | 12,4                                                                                                          | 12,4                                                                                                         | 11,4                                    | 9,6                                     |
| 22 | "                           | "                            | "                               | To же               | 7                                                    | 7,5                                                                                             | 11,4                                                                                                          | 11,4                                                                                                         | 8,8                                     | 10                                      |
| 23 | "                           | "                            | "                               | To же               | 7                                                    | 7,5                                                                                             | 12,1                                                                                                          | 12,1                                                                                                         | 8,8                                     | 10                                      |
| 24 | "                           | "                            | "                               | "                   | 7                                                    | 7,5                                                                                             | 12,1                                                                                                          | 12,1                                                                                                         | 9,6                                     | 11                                      |
| 25 | 2,555                       | 9                            | 15                              | To же               | 7,8                                                  | 7,5                                                                                             | 12,55                                                                                                         | 12,55                                                                                                        | 9,2                                     | 10                                      |
| 26 | To же                       | "                            | "                               | To же               | 7,8                                                  | 7,5                                                                                             | 12,55                                                                                                         | 12,55                                                                                                        | 6,8                                     | 5,6                                     |
| 27 | "                           | "                            | "                               | To же               | 7,6                                                  | 7,4                                                                                             | 7,87                                                                                                          | 7,87                                                                                                         | 7,95                                    | 7                                       |
| 28 | "                           | "                            | "                               | To же               | 7,6                                                  | 7,4                                                                                             | 7,87                                                                                                          | 7,87                                                                                                         | 7                                       | 7                                       |
| 29 | "                           | "                            | "                               | To же               | 7,5                                                  | 7,4                                                                                             | 7,87                                                                                                          | 7,87                                                                                                         | 8,18                                    | 6                                       |
| 30 | 3,635                       | 3                            | 12                              | To же               | 7,5                                                  | 7,9                                                                                             | 7,9                                                                                                           | 7,9                                                                                                          | 8,18                                    | 6                                       |
| 31 | 3,930                       | 6                            | 15                              | To же               | 7,35                                                 | 7,5                                                                                             | 7,5                                                                                                           | 7,5                                                                                                          | 17,9                                    | 14,8                                    |
| 32 |                             |                              |                                 |                     |                                                      |                                                                                                 |                                                                                                               |                                                                                                              | 11,8                                    | 10,8                                    |

Среднее значение  $t_E = 7,45 \pm 0,3$  мсек. Среднее значение  $r_1 = 850\%$ .  
 Среднее значение  $t_{E'} = 7,5 \pm 0,3$  мсек. Среднее значение  $r_2 = 74,5\%$ .  
 $t_{E'}$  и  $P_{E'T'}$  указываются только тогда, когда имеется различие от  $t_E$  и  $P_E$ .

В тех же самых опытах и при той же технике измерений были получены кривые внутригрудного давления. Сравнение этих кривых с кривыми, построенными по уравнению (6), показывает, что на одних участках экспериментальные кривые весьма близко следуют уравнению (6), а на других — сильно отклоняются от него. Результаты этого исследования можно свести к следующему.

1. Между точкой  $O'$ , соответствующей началу декомпрессии, и точкой  $E'$  кривая внутригрудного давления следует закону, аналогичному уравнению (6).

2. Начиная с точки  $E'$ , кривая внутригрудного давления резко отклоняется от закона (6), т. е. точка  $E'$  представляет собой точку начала расхождения кривых и изгиба кривой давления.

3. Интервал времени между точками  $O'$  и  $E'$  является постоянным и равным 7,5 мсек ( $7,5 \pm 0,3$ ). Этот интервал равен интервалу времени между точками  $O$  и  $E$ . Таким образом, точки  $E$  и  $E'$  являются соответственными точками.

4. Если, приняв точку  $O'$  за исходную, измерить избыточное давление в точке  $E'$  и сравнить его с давлением, подсчитанным по уравнению (6), то можно видеть, что средняя точность этого уравнения составляет 74,5%.

Наблюдаемая разница между избыточным давлением в легких и давлением в грудной полости, видимо, должна быть объяснена тем, что датчики давлений размещаются в различных участках: датчик внутрилегочного давления, помещенный в легочную артерию, позволяет регистрировать давление в центре грудной полости; датчик внутригрудного давления, помещенный между рукояткой грудины и стенкой грудной клетки, отражает давление в легких, которое может слегка уменьшаться и изменяться за счет эластичности пристеночной плевры даже без всякого расширения. Все сказанное дает нам право выбрать давление в легочной артерии, как наиболее точно отражающее давление в легких во время взрывной декомпрессии.

## Обсуждение результатов

Полученные результаты измерения внутрилегочного и внутригрудного давления легко истолковать.

1. В первое время между точками  $O$  и  $E$  для избыточного давления в легких и между точками  $O'$  и  $E'$  для

внутригрудного давления расширение легких практически незначительно.

2. Начиная с точек  $E$  и  $E'$  (соответственно для избыточного внутрилегочного и внутригрудного давления) наблюдается прогрессивное расширение легких.

Таким образом, анализ записей внутрилегочного и внутригрудного давления ясно показывает, что в противоположность гипотезам Гэге и Свиная и немецких авторов расширение легких отстает от декомпрессии. Расширение легких полностью не поглощает расширения газа, и в легких после максимального возможного их расширения развивается избыточное давление. Более того, в начале декомпрессии легкие ведут себя как сосуд с неизменяемым объемом, и избыточное давление в них устанавливается аналогично тому, как это наблюдалось в жесткой камере при одном и том же коэффициенте утечки. Грудобрюшное расширение появляется только впоследствии. Подсчет показывает, что такой процесс должен иметь место при любой декомпрессии, если избыточное давление в легких нарастает быстрее, чем происходит расширение легких.

\* \* \*

В этой главе на основе закона декомпрессии в кабине при внешнем постоянном давлении мы изучили закон изменения давления в легких во время декомпрессии в кабине.

1. С помощью скоростной киносъемки мы показали, что для декомпрессии продолжительностью 20 мсек при отношении давлений, равном приблизительно 2,5, и при коэффициенте утечки  $1/3 \text{ м}^2/\text{м}^3$  грудная клетка остается неподвижной менее 10 мсек. Но такой метод исследования, несмотря на определенные достоинства, не дает возможности проследить изменение положения диафрагмы и потому не может рассматриваться как вполне удовлетворительный. Только анализ записей давления в легких дает возможность разобраться в общей эволюции грудного объема.

2. Были изучены кривые избыточного внутрилегочного давления, отражающие случаи расширения легких: а) без сопротивления, б) реальное.

При этом было установлено следующее:

а) когда легкие расширяются без сопротивления, избыточное давление незначительно и линия давления параллельна оси времени;

б) когда расширение легких незначительно во время

декомпрессии в кабине, мгновенное изменение абсолютного давления в легких  $p_{\text{абс}}$  равно

$$\frac{dp_{\text{абс}}}{dt} = K_c \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_m}{\rho_m}} V p_{\text{абс}}^2 - p_m^2,$$

где  $p_{\text{абс}}$  — мгновенное абсолютное давление в легких;

$p_m$  — мгновенное давление в кабине;

$\rho_m$  — плотность легочного газа при давлении  $p_m$ ;

$\frac{S}{V}$  — коэффициент утечки легких.

Это уравнение было решено методом «изоклинов», принимая  $p_{\text{абс}} = p_k$  и  $\frac{S}{V}$ , равным коэффициенту утечки трахеи.

Оказалось, что при постоянном объеме легких избыточное давление в них  $p_{\text{абс}} - p_m$  в течение первых 10 мсек почти равно  $p_k - p_m$ . Поэтому в течение этого времени можно без существенной ошибки пренебречь истечением воздуха через трахею и рассматривать полость легких как закрытую.

3. При сравнении экспериментальных записей с двумя разобранными теоретическими случаями нами было показано, что в самом начале декомпрессии кабины, приблизительно в первые 7,5 мсек, легкие ведут себя как сосуд с неизменяемым объемом. Только после этого начинается прогрессивно увеличивающееся расширение грудной полости и экспериментальная кривая отклоняется от теоретической кривой для постоянного объема. Избыточное давление в легких имеет большую величину и развивается быстрее, чем при условии, что в каждый момент происходило бы немедленное и общее расширение легких. Этот факт игнорируется до настоящего времени во всех формулах безопасности, которые основываются на гипотезе, что легкие расширяются до своего максимального объема без сопротивления и опоздания.

Впрочем, опыт показывает, что в случае взрывной декомпрессии с высокими коэффициентами утечки наличие или отсутствие повреждений легких больше связано с отношением начального и конечного давления, чем с их разницей. Как это показали эксперименты и как это полностью подтвердили недавние происшествия, для коэффициента порядка  $1/2 \text{ м}^2/\text{м}^3$  это отношение не должно превышать 2,3. Эта величина, по-видимому, является пределом отношения давлений, ниже которого повреждений не может быть, каким бы ни был коэффициент утечки.

---

## Г л а в а VII

# ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ПРИ РАЗВИТИИ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ В ЛЕГКИХ ВО ВРЕМЯ ВЗРЫВНОЙ ДЕКОМПРЕССИИ

Сравнение различных физиологических данных позволяет воспроизвести изменения внутрилегочного давления во время взрывной декомпрессии. Но каждые из этих данных необходимо, кроме того, изучить в отдельности. В этой главе будут рассмотрены кратковременные изменения различных давлений, которые были зарегистрированы при помощи нашей техники регистрации: внеплевральное грудное давление, венозное давление, давление в легочной артерии, давление спинномозговой жидкости и давление в сонной артерии.

Мы ограничимся изучением тех участков записей, которые включают в себя совокупность изменений легочного давления, начиная с момента декомпрессии. Все важные и интересные явления, которые нельзя было изучить при отсутствии соответствующей системы регистрации, находятся в этой части записей, и вне ее не было найдено никакого значительного феномена, который не был бы описан с достаточной точностью при помощи общеизвестной техники электрической регистрации.

Нами было выполнено 207 взрывных декомпрессий на 84 собаках. Но изучался только результат 95 декомпрессий, произведенных на 33 собаках при быстрой регистрации (аппарат Флёри, приспособленный для физиологических целей и дающий достаточно хорошие результаты при записи явлений, происходящих за время менее  $\frac{1}{100}$  сек). В этих опытах был использован целый ряд начальных давлений от 760 до 126 мм рт. ст. и конечных давлений, равных половине начального. Коэффициент утечки равнялся

$1/3,24 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , а общая продолжительность декомпрессии была около 0,02 сек.

В результате проведенных опытов было получено 93 записи грудного внеплеврального давления, 24 записи давления в полых венах, 9 записей давления в яремной вене, 43 записи давления в легочной артерии, 9 записей давления спинномозговой жидкости и 78 записей давления в сонной артерии.

Изучение изменений физиологических функций и их механизма лучше всего начать с записей давления в легочной артерии и давления спинномозговой жидкости, которые не только являются однотипными, но и хорошо отражают изменения внутрилегочного давления. Затем мы рассмотрим записи внеплеврального грудного давления и венозного давления, которые имеют некоторое сходство между собой, и последним мы изучим давление в сонной артерии.

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАПИСЕЙ ДАВЛЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ ТЕЛА .

### Давление в легочной артерии и давление спинномозговой жидкости

При рассмотрении кривых давления в легочной артерии и давления спинномозговой жидкости можно выделить три периода (рис. 8):

- в первый период, равный приблизительно 7,5 мсек, наблюдается резкое увеличение давления;
- во второй период в течение 10—20 мсек кривые изгибаются более или менее быстро, проходя максимум, который предшествует концу декомпрессии в кабине;
- в третий период кривые довольно быстро возвращаются к своему начальному уровню. На нисходящей части кривой давления спинномозговой жидкости нельзя отметить существенных колебаний. Напротив, на кривой давления в легочной артерии часто видны отчетливые дополнительные колебания.

Первая часть кривых соответствует, как это было показано в главе VI, развитию избыточного давления в легких при постоянном его объеме. Это избыточное давление под-

чиняется следующему закону, выраженному дифференциальным уравнением:

$$\frac{dp_{\text{абс}}}{dt} = K_c \frac{S}{V} \sqrt{\frac{p_m}{\rho_m}} \cdot V p_{\text{абс}}^2 - p_m^2, \quad (1)$$

где  $\frac{S}{V}$  — средний коэффициент утечки трахеи в  $m^2/m^3$ ;

$p_{\text{абс}}$  — абсолютное давление в легких во время декомпрессии  $t$ ;

$p_m$  — мгновенное давление в кабине;

$\rho_m$  — плотность, соответствующая давлению  $p_m$  газа в легких.

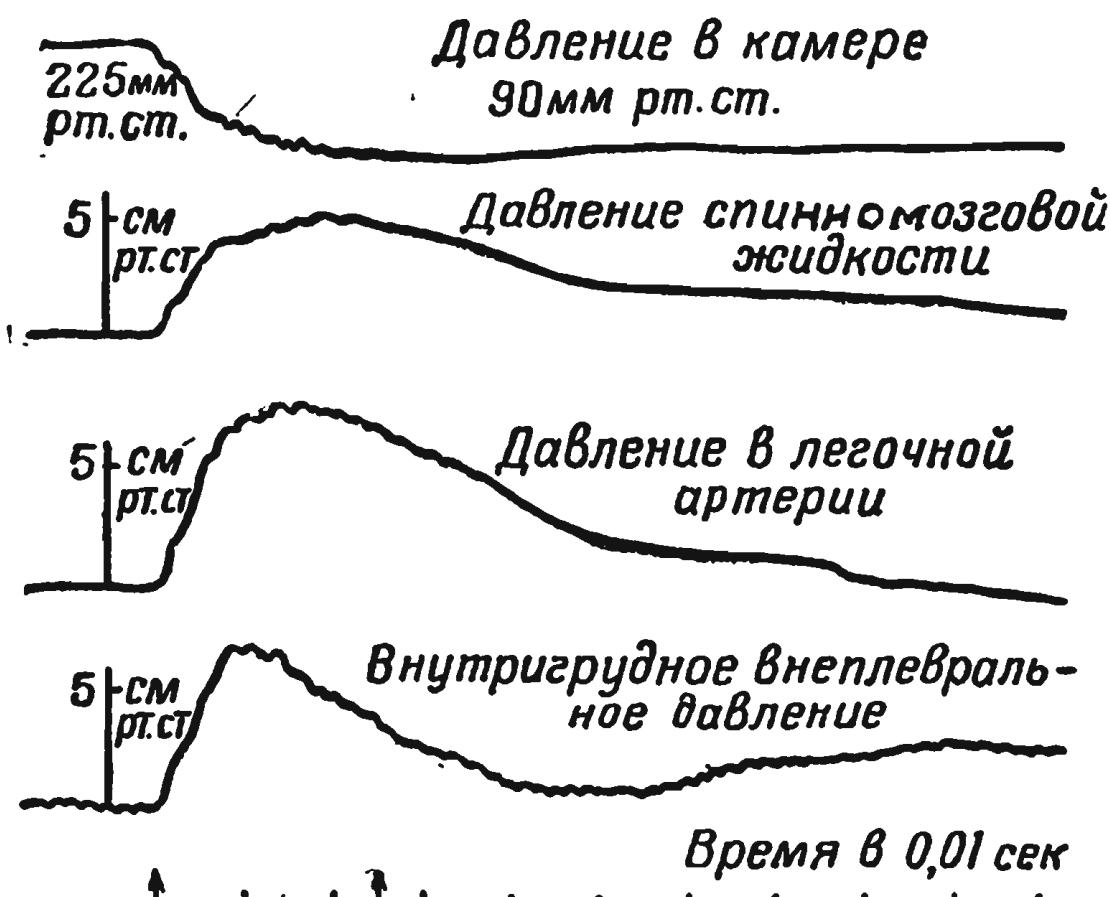
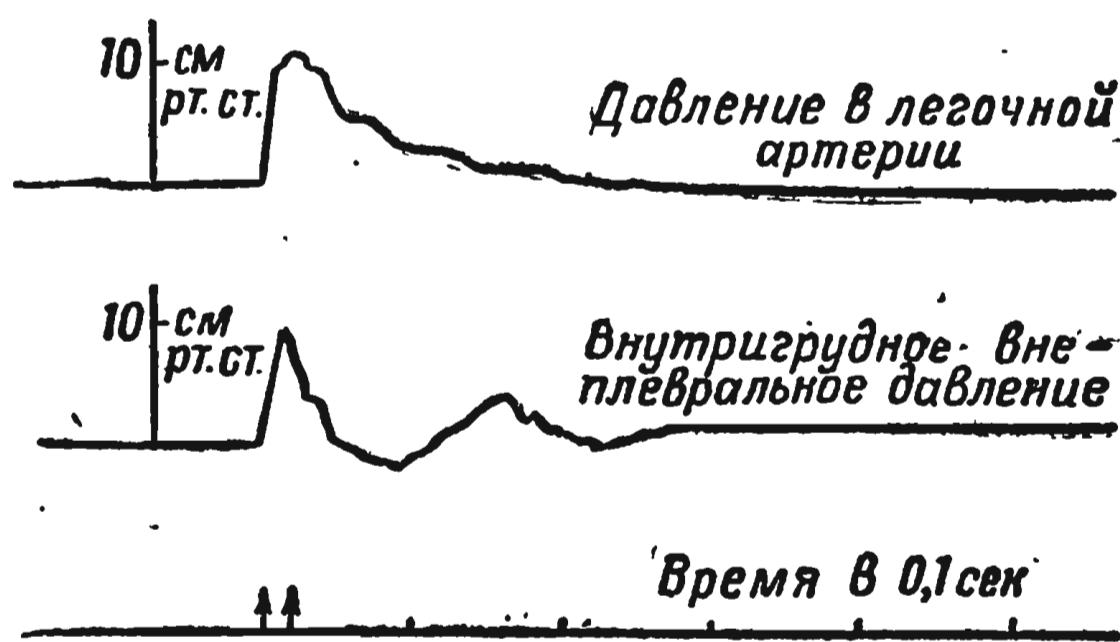


Рис. 8. Результат декомпрессии, произведенной над собакой под хлоралозовым наркозом

Между двумя стрелками — взрывная декомпрессия от давления 225 мм (9000 м) до давления 90 мм рт. ст. (15 000 м)

Мы никогда не наблюдали на кривой крутой начальной волны. Следовательно, взрывной волны в том смысле, как ее понимают физики, не наблюдалось, а имело место быстрое установление внутрилегочного избыточного давления.

Вторая половина кривых соответствует концу декомпрессии в кабине. Скорость декомпрессии в кабине постепенно уменьшается, приближаясь к нулю, и одновременно изменение давления в легких, уменьшаясь в амплитуде, отклоняется от закона (1). Представленные кривые давле-



**Рис. 9.** Результат декомпрессии, произведенной над собакой под хлоралозовым наркозом

Между двумя стрелками — взрывная декомпрессия от давления 230 мм (9000 м) до давления 90 мм рт. ст. (15 000 м). Отмечается закономерность понижения внутрилегочного давления, хорошо видная при этой скорости записи (40 см/сек)

ния являются суммарным результатом различных влияний, среди которых преобладает грудобрюшное расширение. Эта фаза еще изучается.

Третья часть кривых соответствует декомпрессии в легких при постоянном внешнем давлении. Но на идеальную кривую декомпрессии в легких могут накладываться паразитарные колебания, вызванные неизбежным внешним влиянием (колебания грудной клетки, собственные колебания внутренней сосудистой системы при записи давления в легочной артерии). Во всех случаях на линии давления спинномозговой жидкости наблюдается минимум добавочных вредных колебаний, которые еще более выражены на линии давления в легочной артерии (рис. 8 и 9), если декомпрессия совпадает с желудочковой диастолой.

Итак, видно, что эти две линии достаточно точно отражают изменения внутрилегочного давления, причем из них можно было бы выбрать линию давления спинномозговой жидкости. Но после недавних исследований Гамильтона [44], проведенных с использованием техники, позволяющей проводить регистрацию с большой точностью, стало известно, что амплитуда записи давления спинномозговой жидкости пропорциональна лишь изменениям давления в легких, тогда как давление в легочной артерии представляет быстрое перемещение жидкости и точно воспроизво-

дит внутрилегочное давление. Поэтому при благоприятных условиях запись давления в легочной артерии (одновременно с записью давления спинномозговой жидкости в качестве контроля) представляет весьма точно и в истинной величине изменения внутрилегочного давления.

Этот результат очень важен. Он позволяет, пользуясь экспериментальными кривыми давления в легочной артерии, определить закон легочной декомпрессии и закон давления в легких при переменном режиме. Этот подсчет мы уже разбирали в главах V и VI.

### Внеплевральное внутригрудное давление и давление в венах

Внеплевральное внутригрудное давление и давление в венах развиваются в два периода (рис. 10).

В первый период продолжительностью приблизительно 7,5 мсек наблюдается резкое увеличение давления. В случае внеплеврального внутригрудного давления и давления в полых венах это увеличение почти идентично тому, которое наблюдалось при измерении давления в легочной

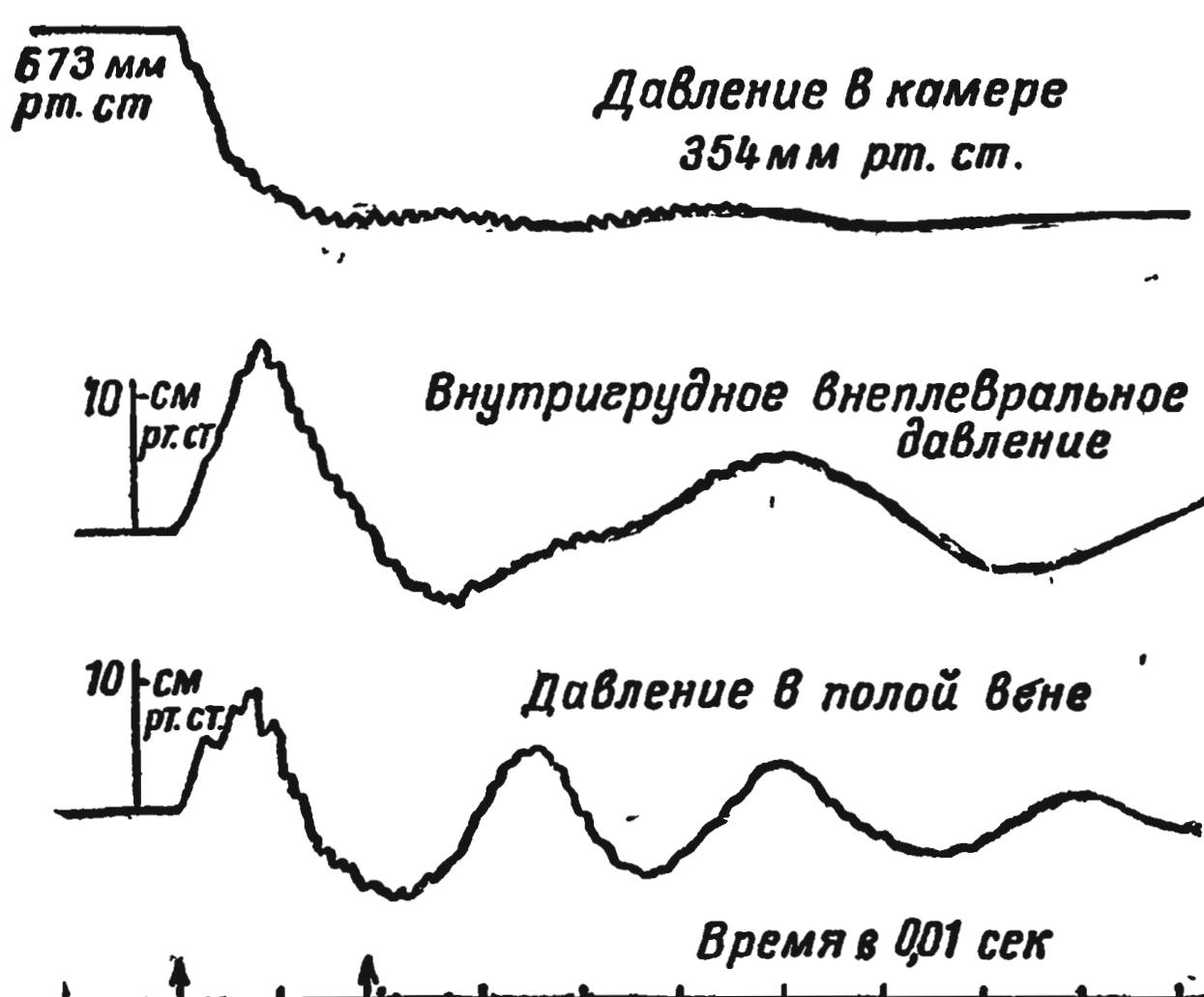


Рис. 10. Результат декомпрессии, произведенной над собакой под хлораловым наркозом  
Между двумя стрелками — взрывная декомпрессия от давления 673 мм (1000 м) до давления 354 мм рт. ст. (6000 м)

артерии. В случае давления в яремной вене увеличение давления имеет ту же форму, но с меньшей амплитудой.

В второй период внеплевральное грудное давление быстро уменьшается, затем, после небольшого увеличения, возвращается к своей начальной величине с колебаниями значительного периода и небольшой амплитуды. Также быстро уменьшается давление в венах, затем оно вновь увеличивается и возвращается к первоначальной величине, но с колебаниями более короткого периода (порядка 0,02 сек) и значительной амплитуды.

Первая, начальная часть кривых внеплеврального внутригрудного давления и давления в венах соответствует аналогичным частям кривых давления в легочной артерии. Она также отражает изменение избыточного давления в легких при постоянном объеме последних и следует закону (1). И здесь мы никогда не наблюдали крутой начальной волны на кривых.

Вторая часть кривых более трудна для расшифровки. Можно предположить, что расширение грудной клетки, вызывающее резкое падение внутригрудного давления, сопровождается колебательными движениями грудной клетки вокруг своего нового положения равновесия, что влечет за собой местные, довольно значительные изменения давления. Это резкое падение внутригрудного давления может также вызвать серию собственных колебаний сосудистой системы.

## Давление в сонной артерии

Кривая давления в сонной артерии весьма различна для разных животных. Тем не менее можно выделить наиболее часто встречающийся тип кривой, которая напоминает кривую давления в яремной вене.

В первый период продолжительностью около 7,5 мсек наблюдается резкое увеличение артериального давления, однако менее высокое, чем избыточное давление в легких, которое его вызывает.

Во второй период давление резко падает, затем после нового небольшого повышения возвращается к своей первоначальной величине с колебаниями короткого периода (примерно 0,02 сек) и значительной амплитуды, которые довольно быстро затухают.

Кроме того, достаточно часто наблюдалась повторная волна повышения давления значительной амплитуды, не-

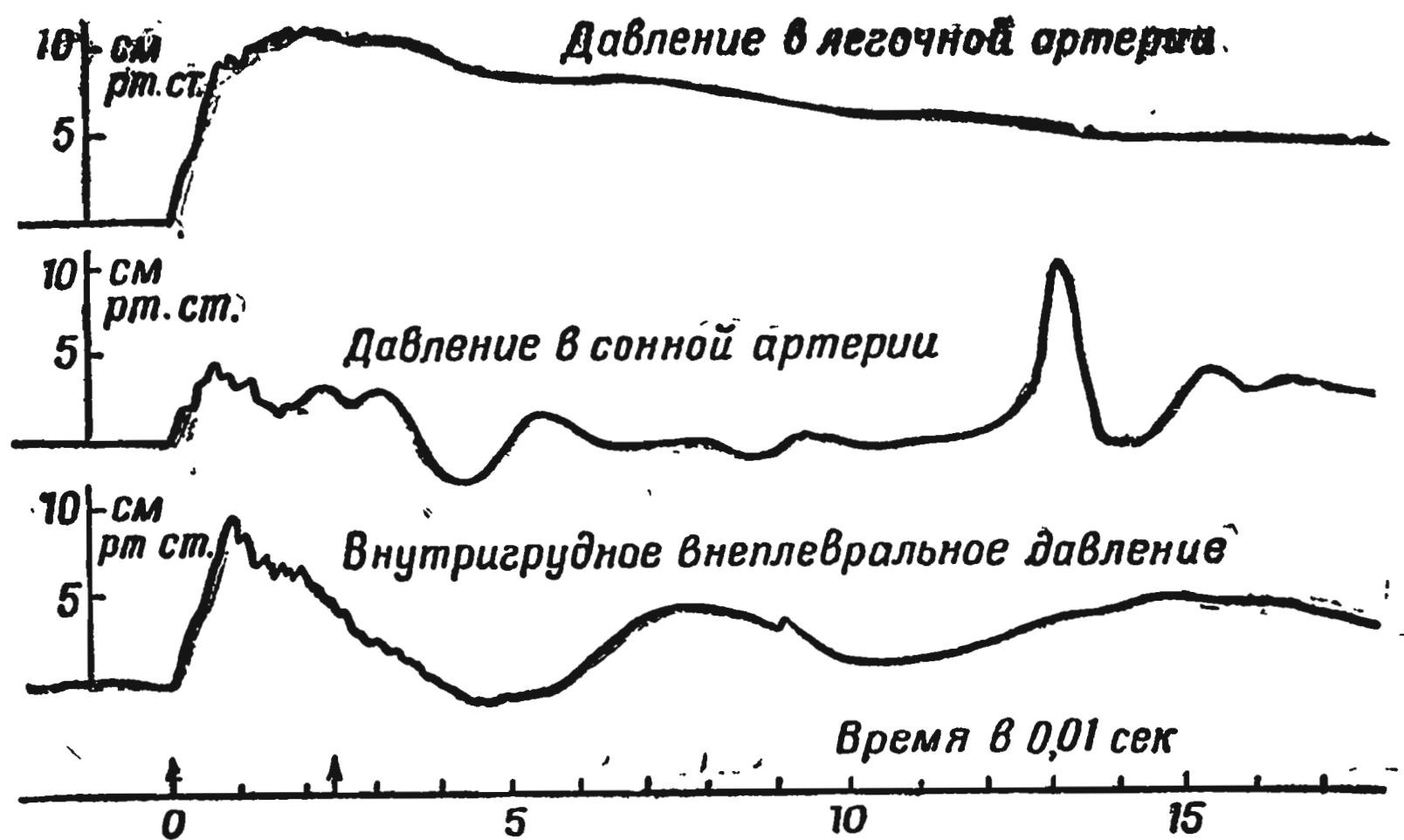


Рис. 11. Результат декомпрессии, произведенной над собакой под хлоралозовым наркозом

Между двумя стрелками — взрывная декомпрессия от давления 354 мм (6000 м) до 145 мм рт. ст. (12 000 м). Заметна значительная волна повышения давления в сонной артерии, появляющаяся через 0,13 сек после начала декомпрессии

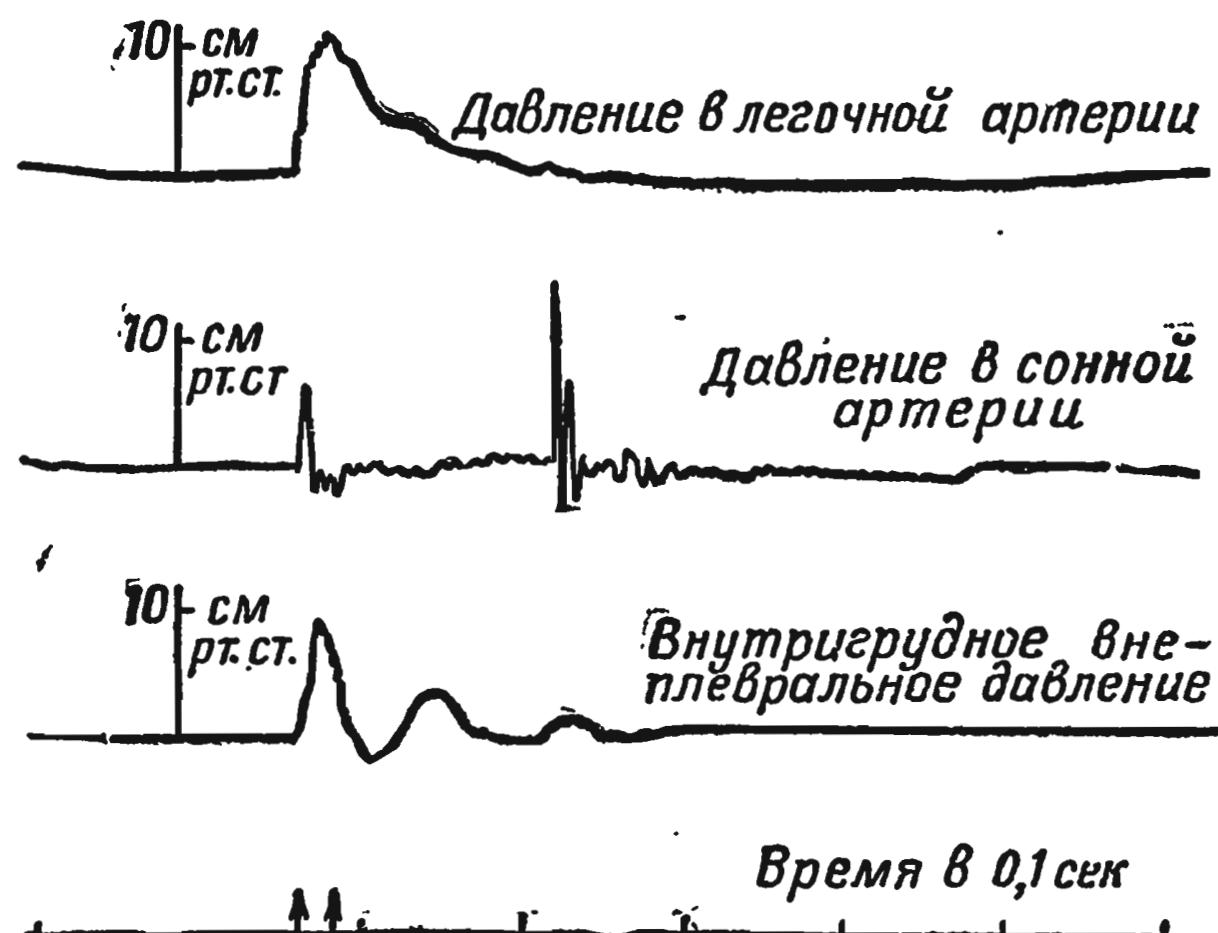
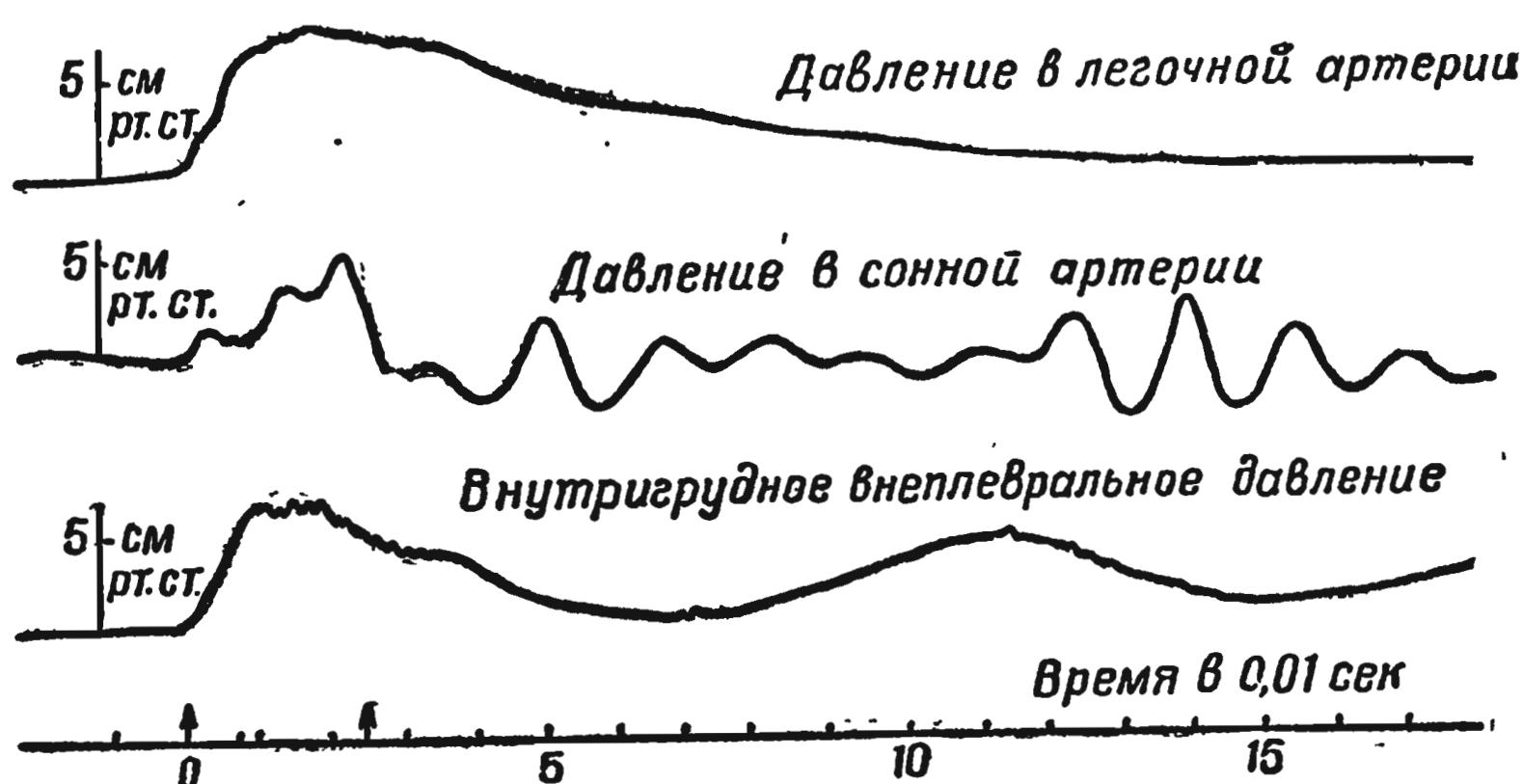


Рис. 12. Результат декомпрессии, произведенной над собакой под хлоралозовым наркозом

Между двумя стрелками — взрывная декомпрессия от давления 354 мм (6000 м) до 145 мм рт. ст. (12 000 м). Отмечаются значительная волна повышения давления в сонной артерии, появляющаяся через 0,15 сек после начала декомпрессии, и, кроме того, закономерность уменьшения легочного давления, видимая на кривой давления в легочной артерии в противоположность колебаниям кривой внутригрудного давления

редко превышающей амплитуду первого повышения артериального давления. Эта вторичная волна неожиданно появлялась через 0,1 или 0,2 сек после начала декомпрессии (рис. 11, 12, 13).



**Рис. 18.** Результат декомпрессии, произведенной над собакой под хлоралозовым наркозом

Между двумя стрелками — взрывная декомпрессия от давления 230 мм (9000 м) до 90 мм рт. ст. (15 000 м). Видны вторичные волны давления в сонной артерии, появляющиеся через 0,13 сек после начала декомпрессии

Эта волна повышенного давления, вызванная, вероятно, отражением начального толчка в артериальной системе, как нам кажется, не имеет вредных последствий в условиях декомпрессий, которые мы изучали.

### Значение некоторых изменений физиологических функций

Некоторые необычные изменения кривых давления имеют важное значение. Предобморочное или обморочное состояние, описываемое испытуемыми в подобных случаях, следует объяснить резким повышением давления спинномозговой жидкости во время декомпрессии в кабине, а не ударной волной в системе кровообращения в физическом смысле этого слова, как это утверждали Уайтхорн и Хитчкок [47, 83], и не отраженной волной, которую мы наблюдали в артериальной системе.

Как уже было показано, в венозной системе наблюдается появление волн короткого периода и значительной амплитуды. Кровоизлияния в легких, сердце и внутримозговые, подробно изучавшиеся и описанные Эдельманном [20], а затем подтвержденные различными авторами, в том числе и нами [47], могли быть вызваны разрывом венозных

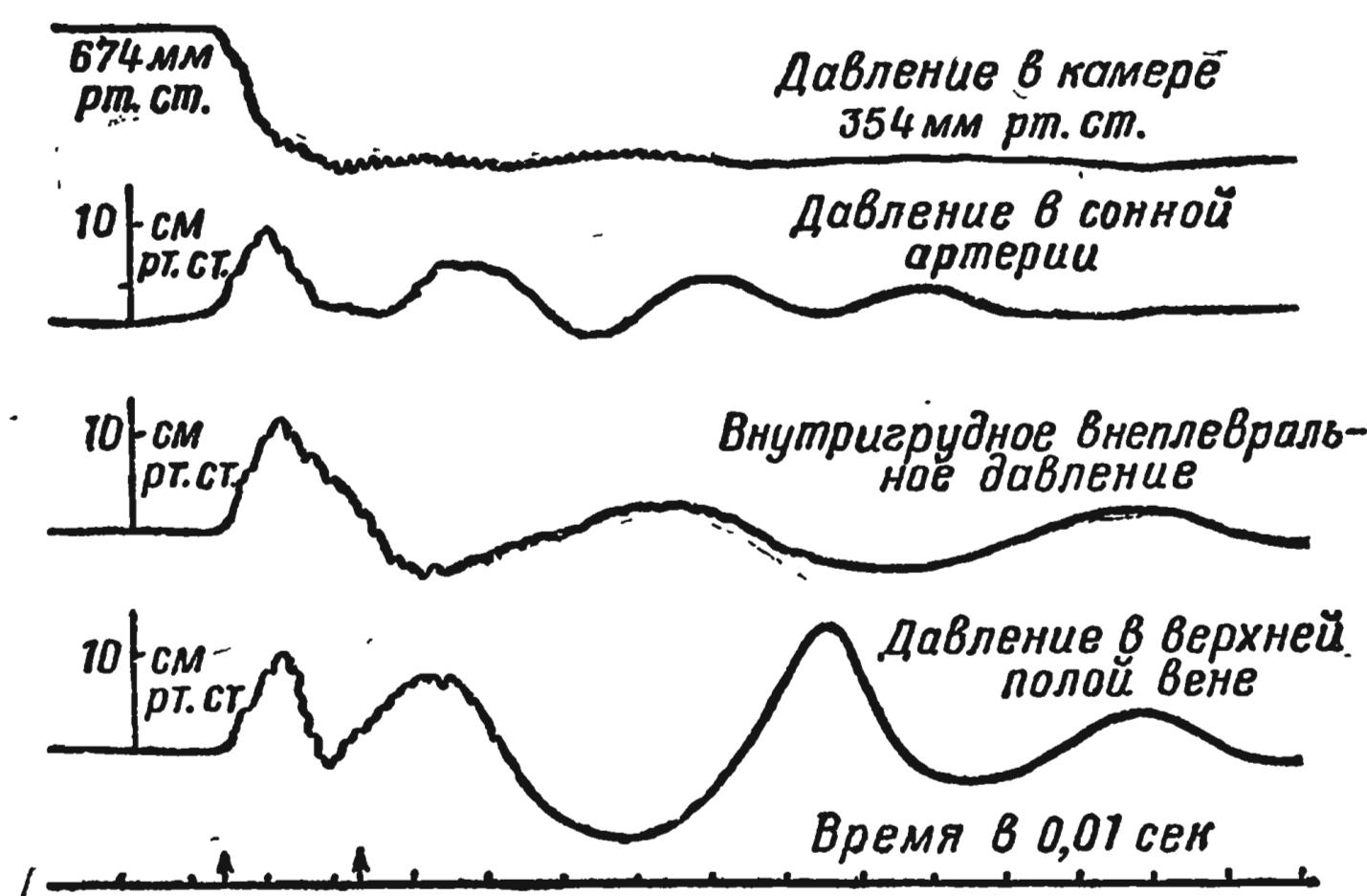


Рис. 14. Результат декомпрессии, произведенной над собакой под хлораловым наркозом

Между двумя стрелками — взрывная декомпрессия от давления 674 мм (1000 м) до 354 мм рт. ст. (6000 м). Видны колебания давления в сонной артерии и колебания значительной амплитуды венозного давления

капилляров под действием быстрых и резких колебаний венозного давления (рис. 14, 15, 16), передаваемых по сосудам, начиная с сосудов грудной полости.

Эти факты заставляют пересмотреть механизм развития и образования кровоизлияний, описанных Бержере и Жиорданом [5] и Коулом [14, 15] и которые Чэнг, Маргариа и Желфган [11] объясняли только влиянием рекомпрессии. Известно, что вены слуховой полости сообщаются с мозговыми венами. Кровоизлияние за барабанной перепонкой, выявляющееся при рекомпрессии, может быть связано с разрывом весьма хрупких венозных капилляров вследствие резкого повышения внутрисосудистого давления в момент декомпрессии.

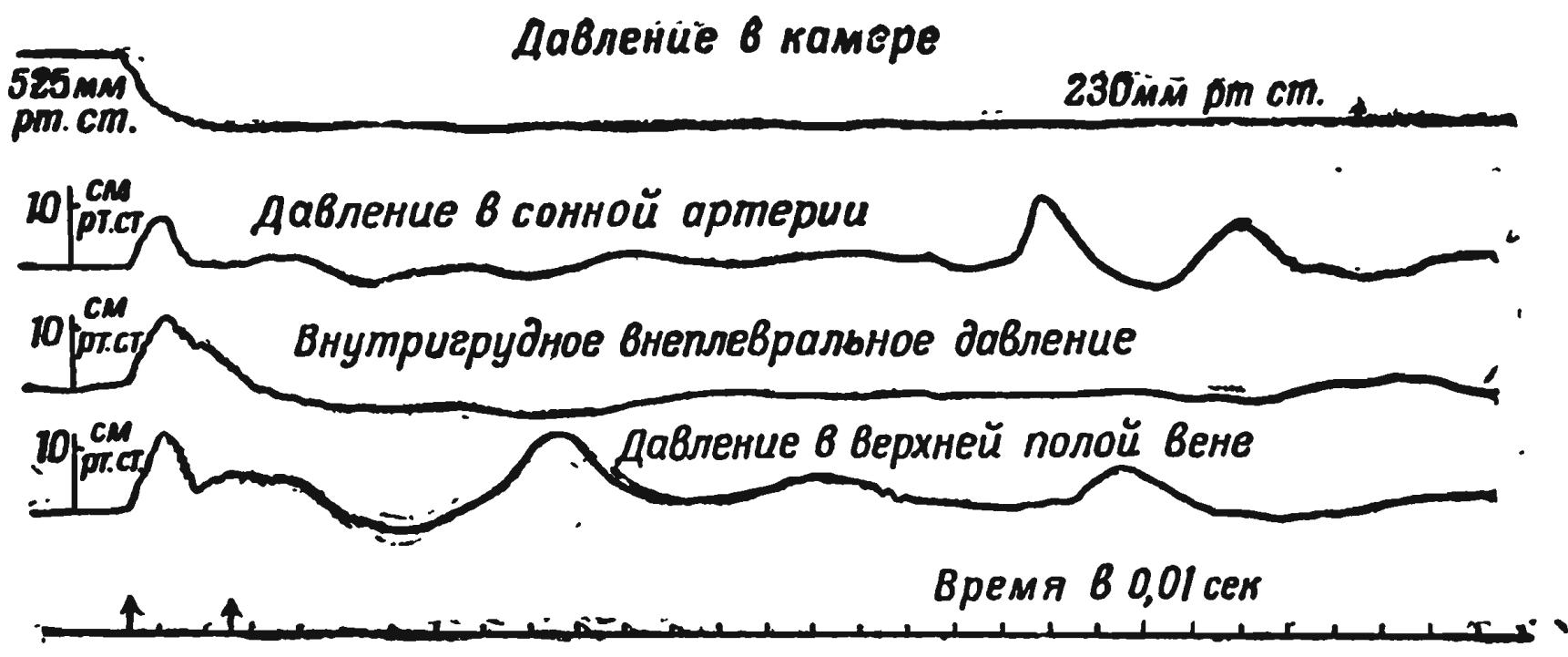


Рис. 15. Результат декомпрессии, произведенной над собакой под хлоралозовым наркозом

Между двумя стрелками — взрывная декомпрессия от давления 525 мм (3000 м) до 230 мм рт. ст. (9000 м). Заметны две волны значительного повышения давления в сонной артерии, появляющиеся через 0,19 сек после начала декомпрессии, и, кроме того, колебания давления в верхней полой вене

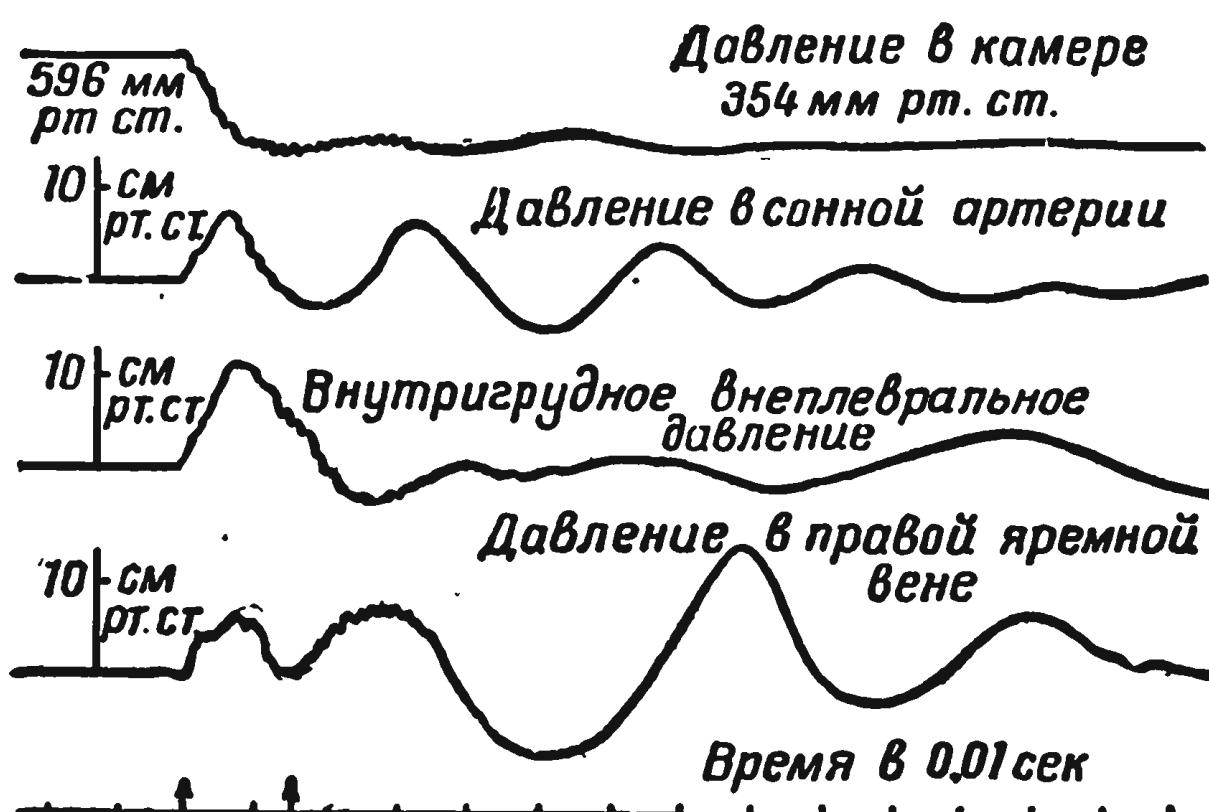


Рис. 16. Результат декомпрессии, произведенной над собакой под хлоралозовым наркозом

Между двумя стрелками — взрывная декомпрессия от давления 596 мм (2000 м) до 354 мм рт. ст. (6000 м). Видны колебания давления в сонной артерии, а также вторичные колебания давления в яремной вене, представляющие контраст с относительно невысокими начальными волнами

\* \* \*

В этой главе были изучены характерные особенности кривых, полученных при записи различного вида давлений: внутригрудного внеплеврального, венозного, спинномозговой жидкости, а также в легочной и сонной артериях. Эти данные позволяют по-новому объяснить некоторые факты

Наши данные, полученные при изучении результатов 95 декомпрессий, выполненных на 33 собаках, физиологические функции которых были зарегистрированы на аппарате Флёри, позволяют сделать следующие выводы.

1. Внутригрудное внеплевральное давление, венозное давление, давление спинномозговой жидкости, давление в легочной и сонной артериях быстро увеличиваются в начале декомпрессии. Это увеличение соответствует возникновению избыточного давления в легких при неизменном их объеме, но не носит характер ударной волны в том смысле, как это понимают физики.

2. Резкое увеличение давления спинномозговой жидкости позволяет объяснить наблюдающееся у человека ощущение потемнения в глазах во время взрывной декомпрессии.

3. Резкое увеличение давления в венозной системе вызывает ряд толчкообразных колебаний, которые, подобно ударным волнам, распространяются по венам. Этим можно объяснить появление различных повреждений геморрагического\* характера в легких, в сердце, под твердой мозговой оболочкой и сзади барабанной перепонки, которые наблюдались как осложнение взрывных декомпрессий.

4. Аналогичные волны в начале декомпрессии достаточно часто наблюдаются и в артериальной системе, причем вторичная волна, появляющаяся через 0,1—0,2 сек после декомпрессии, имеет большую амплитуду, чем первичная. По нашему мнению, эта волна повышенного давления не вызывает каких-либо повреждений, тем более в условиях декомпрессий, которые мы изучали.

---

\* Геморрагия — кровоизлияние.— Прим. ред.

---

## Г л а в а VIII

# РАЦИОНАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗРЫВНОЙ ДЕКОМПРЕССИИ

Дифференциальное выражение закона декомпрессии показывает, что всякая декомпрессия зависит от двух параметров:

- коэффициента утечки  $F$  (отношение площади отверстия утечки к объему кабины);
- отношения  $R$  (отношение начального давления к конечному давлению).

Классификация декомпрессий с помощью этих двух параметров, которые входят в выражение закона декомпрессии в весьма простой форме, основывается на прочной теоретической базе.

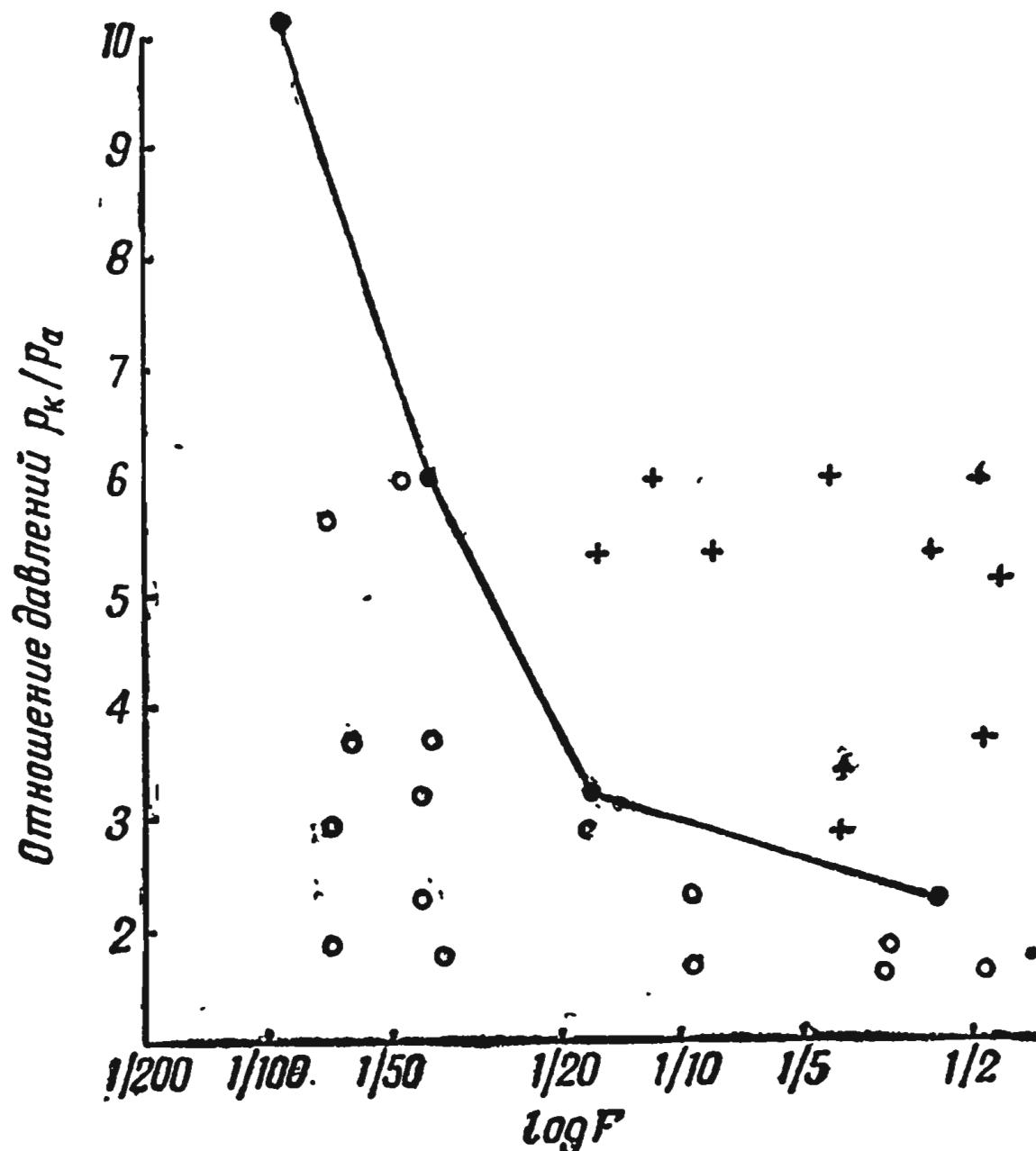
В главе V мы показали, что если коэффициент утечки меньше критического ( $\frac{1}{100} \text{ м}^2/\text{м}^3$ ), декомпрессии безопасны, каково бы ни было отношение давлений. Точно так же декомпрессии безопасны при отношении давлений ниже критического (2,3), каков бы ни был коэффициент утечки.

Откладывая по оси ординат отношение давлений, а по оси абсцисс — коэффициент утечки  $F$  или его логарифм, можно представить условия каждого опыта в виде точки пересечения соответствующих координат. Если на графике представить таким образом условия всех изученных и известных декомпрессий (рис. 17), можно констатировать, что все точки, характеризующие опасные декомпрессии, группируются в зоне справа от абсциссы  $1/100$  и выше ординаты 2,3. Все точки вне этой зоны соответствуют условиям безопасной декомпрессии.

Быстрой или взрывной декомпрессией мы предлагаем называть всякую декомпрессию, которая по своим усло-

виям может быть опасной; такая декомпрессия имеет место, если налицо есть следующие два условия:

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



+ - точки, соответствующие условиям, вызывающим повреждения  
 ◦ - точки, соответствующие условиям полной безопасности  
 • - точки, соответствующие предельным условиям

**Рис. 17.** Классификация декомпрессий и обозначение их через коэффициент утечки  $F [\text{м}^2/\text{м}^3]$  и отношение давлений  $p_k/p_a$ . Точки, соответствующие предельным условиям, позволяют описать экспериментальную кривую, ограничивающую зону опасности

Это определение позволяет отнести к взрывным все декомпрессии, которые могут вызывать повреждения и могут представлять опасность. Но взрывные декомпрессии не обязательно являются опасными.

Внутри зоны взрывной декомпрессии существуют точки, соответствующие коэффициентам утечки и отношениям

давлений, при которых никогда не наблюдали патологических повреждений.

Таким образом, видно, что между асимптотами, имеющими значения абсциссы  $1/100 \text{ м}^2/\text{м}^3$  и ординаты 2,3, вырисовывается экспериментальная кривая, ограничивающая зону безопасности и зону опасности, кривая, которую можно будет с большой точностью определить при дальнейших исследованиях.

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание герметических кабин, в которых поддерживается избыточное давление, имеет очень важное значение и в то же время может представлять серьезную опасность из-за возможности разгерметизации кабин. При разгерметизации пассажиры подвергаются воздействию более или менее быстрой декомпрессии.

Обычно взрывной декомпрессией принято называть случайную и быструю потерю избыточного давления. Естественно возникает вопрос, представляют ли декомпрессии опасность для организма человека или животного.

Необходимость изучения этого вопроса вытекала из того, что, несмотря на многочисленные исследования, не было создано теории, полностью объясняющей наблюдаемые при декомпрессии явления.

Наши исследования позволили выявить два основных положения:

- а) некоторые декомпрессии, особенно быстрые, могут вызвать патологические повреждения внутренних органов;
- б) эти повреждения вызываются возникновением избыточного давления в легких.

Возможны следующие два пути предотвращения при декомпрессии опасного действия избыточного внутрилегочного давления.

1. Добиться того, чтобы давление в кабине снижалось медленнее, чем давление в легких. Рассмотрение этого пути привело к изучению, определению и сравнению законов декомпрессии в кабине и в легких. Оказалось возможным выявить необходимые требования к конструкции герметических кабин, выполнение которых обеспечивало бы пассажирам безопасность в условиях взрывной декомпрессии.

2. Ограничить давление в кабине. Рассмотрение этого пути привело к изучению влияния избыточного давления,

возникающего при взрывной декомпрессии в легких, на сами легкие и на грудную клетку. Возник вопрос, сопротивляется ли грудная клетка избыточному давлению или расширяется без сопротивления?

Для проведения этих исследований нами использовалась система регистрации внутрилегочного давления и кровяного давления, точность которой достаточна для получения записей за время 0,01 сек. Основным элементом этой системы регистрации является датчик, электростатическая ёмкость которого изменяется при изменении давления.

Наши исследования позволили вывести и уточнить следующие четыре положения: 1) закон декомпрессии в кабине; 2) закон декомпрессии в легких; 3) закон изменения давления в легких во время декомпрессии в кабине; 4) влияние взрывной декомпрессии на некоторые физиологические функции. Кроме того, эти исследования позволили установить закон расширения газов в легких и внутренних полостях организма, знание которого необходимо для определения закона декомпрессии в легких.

1. Ряд проведенных нами опытов позволяет утверждать, что при взрывной декомпрессии декомпрессия в кабине и декомпрессия в легких следуют единому закону, который выражается эмпирическим уравнением:

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

где  $t_0$  — время декомпрессии в кабине;

$p$  — мгновенное давление за время  $t$ ;

$p_a$  — конечное давление;

$K$  — экспериментальный коэффициент.

Коэффициент  $K$  постоянен для всего времени декомпрессии и равен

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

где  $\frac{S}{V}$  — коэффициент утечки воздуха из кабины (отношение площади  $S$  отверстия истечения газа из объема  $V$ );

$\rho_a$  — плотность газа при конечных условиях;

$K_c$  — постоянный безразмерный коэффициент сжатия газа в отверстии ( $0,9 \pm 0,02$  в наших опытах).

Постоянство коэффициента  $K$  во время декомпрессий и его пропорциональность  $\sqrt{\frac{p_a}{\rho_a}}$  показывают, что истече-

ние воздуха через отверстие происходит так, как если бы расширение газа было изотермным и протекало при конечной температуре расширения. Такое расширение подчиняется уравнению истечения струи из отверстия, что позволяет вывести уравнение (1) из принципов термодинамики.

2. Нами было показано, что основное различие между декомпрессией в легких и декомпрессией в кабине заключается в наличии двух последовательных коэффициентов легочной утечки, из которых наибольшим является коэффициент утечки трахеи ( $1/50 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ), а наименьшим — коэффициент утечки голосовой щели ( $1/100 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ).

Чтобы предотвратить при декомпрессии возникновение избыточного давления внутри легких, достаточно обеспечить условия, при которых самый большой коэффициент утечки кабины был бы меньше самого малого коэффициента голосовой щели ( $1/100 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ), что при 100% коэффициенте безопасности дает максимальный коэффициент утечки  $1/200 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Если в самолете объем кабины равен  $80 \text{ м}^3$ , высота полета  $12\,000 \text{ м}$  (144,6 мм рт. ст.), а давление в кабине эквивалентно высоте  $1000 \text{ м}$  (674 мм рт. ст.), то отношение давлений равно 4,66. Для такого самолета максимально допустимое отверстие разгерметизации, при котором можно избежать вредного влияния избыточного давления в легких и других неблагоприятных результатов быстрой декомпрессии, не должно превышать

$$80 \cdot \frac{1}{200} = 0,4 \text{ м}^2.$$

Однако при отношении давлений  $R = p_k/p_a$  меньше 4 ( $p_k$  — начальное давление в кабине,  $p_a$  — конечное давление), как показывает опыт, можно пользоваться более высоким максимальным коэффициентом утечки (порядка коэффициента утечки трахеи  $1/50$ ). При этом декомпрессия становится ощутимой, но не представляет никакой опасности.

Если тот же самолет (объем кабины  $80 \text{ м}^3$ ) летает на высоте  $9000 \text{ м}$  (230 мм рт. ст.) с давлением в кабине, соответствующим  $1000 \text{ м}$  (674 мм рт. ст.), то отношение давлений будет  $2,93 < 4$ . При этом допустимое отверстие может быть  $1,6 \text{ м}^2$ .

Эти результаты используются при конструировании

самолетов и позволяют по известному объему кабины и отношению давлений при условиях полета подсчитать максимальное значение поверхностей, представляющих риск разрыва или разрушения (иллюминатор и смотровое окно) соответственно с общей безопасностью против взрывной декомпрессии.

Эти результаты важны как с практической точки зрения, так и с точки зрения теории для изучения механизма дыхания.

3. Изучение давления в легких во время декомпрессии в кабине показало, что за первые 7,5 мсек легкие ведут себя, как сосуд с неизменным объемом. После этого начинается прогрессивное расширение грудной полости. Избыточное давление в легких растет быстрее; оно зависит от дыхательного положения грудной клетки.

Опыт показывает, что при взрывной декомпрессии с наивысшим коэффициентом утечки наличие или отсутствие повреждений связано больше с отношением начальных и конечных давлений, чем с разницей их абсолютных величин. Для коэффициента утечки  $1/2 \text{ м}^2/\text{м}^3$  это отношение не должно превышать 2,3. Эта величина является пределом отношения давлений, ниже которого не бывает повреждений, каков бы ни был коэффициент утечки.

Таким образом, для самолета-истребителя с предельным потолком в 12 000 м (144,6 мм рт. ст.) давление в кабине должно быть  $144,6 \cdot 2,3 = 330 \text{ мм рт. ст.}$  (высота в кабине меньше 6500 м), чтобы пилот был вне опасности при внезапной декомпрессии.

4. Дифференциальное выражение закона декомпрессии показывает, что всякая декомпрессия зависит от двух параметров:

- коэффициента утечки  $F$  (отношение площади отверстия утечки к объему кабины);
- отношения давлений  $R$  (отношение начального давления к конечному).

Классификация декомпрессий с помощью этих двух параметров основывается на прочной теоретической основе.

Как показал опыт, при коэффициенте утечки ниже критического ( $1/100 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ) декомпрессии безопасны, каково бы ни было отношение давлений. Точно так же опыт показал, что при отношении давлений ниже критического (2,3) декомпрессии безопасны, каков бы ни был коэффициент утечки.

Мы предлагаем называть быстрой или взрывной всякую декомпрессию, коэффициент утечки и отношение давлений которой соответственно выше  $1/100 \text{ m}^2/\text{m}^3$  и 2,3. Эти условия необходимы для того, чтобы по результатам взрывной декомпрессии при различных условиях можно было разграничить зону опасной взрывной декомпрессии от зоны безопасной декомпрессии.

5. Исследования показали, что можно установить закон расширения газов, содержащихся во внутренних полостях организма, знание которого необходимо для определения законов декомпрессии в легких. Наличие в воздухе водяного пара, который может конденсироваться при быстром расширении этих газов, создает некоторые особенности. До последнего времени их не учитывали. Эти особенности мы уточнили в настоящей работе.

Мы показали, что расширение  $E = \frac{V_{\text{кон}}}{V_{\text{нач}}}$  (отношение конечного объема к начальному) можно представить с достаточной точностью в виде следующей формулы:

$$E = \left( \frac{p_k}{p_a} \right)^{0,909}, \quad (3)$$

где 0,909 — величина, обратная показателю политропы  $n=1,1$ .

Следовательно, нельзя принять предложенную Лавлейсом и Гэге формулу

$$E = \frac{p_k - 47}{p_a - 47}$$

(давление выражено в мм рт. ст.).

Эта формула, вполне приемлемая при медленной декомпрессии, в случае взрывной декомпрессии отражает не непосредственное расширение, а расширение, наступающее в последней стадии истечения газа из легких после взрыва.

6. Сравнительное изучение различных физиологических давлений показывает, что все они быстро увеличиваются в начале взрывной декомпрессии. Но это увеличение вызвано не взрывной волной, как предполагали некоторые авторы, а передачей резко нарастающего легочного избыточного давления, вызванного отставанием грудобрюшного расширения при быстром уменьшении внешнего давления.

Резкое увеличение давления спинномозговой жидкости позволяет объяснить обморочное состояние людей в момент декомпрессии.

Внезапное увеличение давления в сосудистой системе вызывает волны давления, которые распространяются по венам. Таким образом, можно найти удовлетворительное объяснение повреждений в виде кровоизлияний в легких и сердце, а также кровоизлияний под твердой мозговой оболочкой и позади барабанной перепонки, которые описывались как ряд декомпрессионных проявлений и не были объяснены до настоящего времени.

---

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Armstrong H. G.—The medical problems of sealed high altitude aircraft compartments. *J. Aviat. Med.*, 1936, 7:2.
2. Armstrong H. G.—Principles and practice of aviation medicine. Baltimore, Williams and Wilkins, 1939.
3. Benzingier T.—Physiologische Grundlagen fur Bau und Einsatz von Stratospheren Flugzeugen. *Schrift. d. Deutsch. Acad. d. Luftfahrforschung*, 1943, 7:29.
4. Benzingier T.—Explosive decompression, in German Air Science World War II (Ch. 4M). Washington, U. S. Government Printing Office, 1950.
5. Bergeret P., Giordan P.—Effets des décompressions instantanées sur l'animal. *C. R. Soc. Biol.*, 1939, 121:1044.
6. Bouasse H.—Jets, tubes et canaux. Paris, Delagrave, 1923, p. 438.
7. Burch B. H.—Electrocardiographic observations following explosive decompression of dogs to 30 mm Hg. *Fed. Proc.*, 1949, 8:19.
8. Burch B. H., Hitchcock F. A.—Survival time of dogs at a barometric pressure of 30 mm Hg. *Amer. J. Physiol.*, 1949, 155:429.
9. Burch B. H., Hitchcock F. A.—X. Ray observation of dogs following explosive decompression to 30 mm Hg. *Fed. Proc.*, 1950, 9:19.
10. Burch B. H., Kemph J. P., Vail E. G., Frye S. A., Hitchcock F. A.—Some effects of explosive decompression and subsequent exposure to 30 mm Hg on the hearts of dogs. *J. Aviat. Med.*, 1952, 23:159.
11. Chang H. T., Margaria R., Gelfan S.—Pressure changes and barotrauma resulting from decompression and recompression in the middle ear of monkeys. *Arch. Oto-laryng.*, 1950, 51:378.
12. Cieutat B. Application des jauge d'effort à la mesure des phénomènes biologiques. *Electronique*, 1949, 29:3.
13. Cieutat B.—La mesure des phénomènes biologiques. *Mesures et Contrôle industriel*, 1951, 16:353.
14. Cole C. H., Chamberlain D. M., Kemph J. P., Burch B. H., Hitchcock F. A.—Pathological effects of explosive decompression to 30 mm Hg. *Amer. J. Physiol.*, 1952, 171:714.
15. Cole C. H., Chamberlain D. M., Kemph J. P., Burch B. H., Hitchcock F. A.—Pathological effects of explosive decompression to 30 mm Hg. *J. appl. Physiol.*, 1953, 6:96.
16. Corey E. L.—An experimental study of explosive decompression injury. *Amer. J. Physiol.*, 1947, 150:607.
17. Corey E. L.—Factors in explosive decompression injury. *Amer. J. Physiol.*, 1949, 157:88.

18. Corey E. L., Lewis E. G. — Etiology of explosive decompression injury. *Amer. J. Physiol.*, 1950, 162 : 452.
19. Dowling F., Gelfan S. — Cardiac changes in monkeys following explosive decompression to extreme altitudes. *Fed. Proc.*, 1949, 8 : 36.
20. Edelmann A., Whitehorn W. V., Lein A., Hitchcock F. A. — Pathological lesions produced by explosive decompression. *J. Aviat. Med.*, 1946, 17 : 546.
21. Edelmann A., Whitehorn W. V., Hitchcock F. A. — The effects of explosive decompression on human subjects. *Fed. Proc.*, 1946, 5, Part. 2 : 24.
22. Edelmann A., Stacy R. W. — The effect of explosive decompression to 30 mm Hg on the lung volume of the rat. *Fed. Proc.*, 1947, 6 : 100.
23. Fleury R. — Méthodes et appareils d'observation et d'enregistrement des phénomènes rapides et, en particulier, des pressions des gaz dans les moteurs à combustion. *Techn. et Sci. Aéronaut.*, 1950, 280.
24. Foch A. — Introduction à la mécanique des fluides. Paris, Armand Colin, 1941.
25. Foch A. — Thermodynamique. Paris, E. N. S. Aé., 1951.
26. Franck O. — Kritik der elastischen Membranmanometer. *Ztschr. f. Biologie*, 1903, 44 : 445.
27. Fryer D. I. — Consequence of loss cabin pressure. Report of the Advisory Group for Aeromedical Research and Development (A.G.A.R.D.), 1953.
28. Fusco M., Mellette H., Hitchcock F. A. — Determination of the etiology of pathological effects of explosive decompression, on the lungs of rats. *Fed. Proc.*, 1948, 7 : 39.
29. Fulton J. F. — The spring of the air, in Aviation Medicine in its preventive aspects. London, Oxford University Press, 1948, p. 93.
30. Gagge A. P. — Explosive decompression. A summary and evaluation for aircraft designers. U. S. A. F. Report, 1945.
31. Gagge A. R., Shaw R. S. — Article Aviation Medicine, in Otto Glaser. *Medical Physics*, vol. II, p. 41. Chicago: Year Book Publishers, 1950.
32. Gagge A. P., Sweeney H. M. — A practical criterion for evaluating the danger of explosive decompression. *Fed. Proc.*, 1946, 5, Part. 2 : 31.
33. Garsaux P., Richou M., Laurent M. — Sur les accidents de l'aviation aux hautes altitudes. Recherches expérimentales sur les effets des décompressions brusques par explosion de carlingues étanches. *Bull. Acad. Méd.*, 1939, 122 : 164.
34. Gelfan S. — Explosive decompression of macaque monkeys to extreme altitude and recompression at free fall rates. *J. appl. Physiol.*, 1950, 3 : 254.
35. Gelfan S., Davis G. D. — Explosive decompression of monkeys at extreme altitude. *Fed. Proc.*, 1948, 7 : 40.
36. Gelfan S., Nims L. F., Livingston R. B. — Cause of death from explosive decompression at high altitudes. *Fed. Proc.*, 1947, 6 : 110.
37. Gelfan S., Werner A. Y. — Blood pressure changes following explosive decompression of monkeys to extreme altitudes. *Fed. Proc.*, 1951, 10 : 48.

38. Gelfan S., Werner A. Y.—Cardiovascular responses following explosive decompression of macaque monkeys to extreme altitudes. *J. appl. Physiol.*, 1951, 4: 280.
39. Gillespie K. W.—Determinations of time of decompression in altitude chambers. U.S.A.F. Report, 1952.
40. Grandpierre R., Lemaire R.—Les aspects physiologiques des cabines à surpression pour avions. *Méd. Aéronaut.*, 1947, 2: 212.
41. Grandpierre R., Grognot P., Violette F.—Some particular effects of explosive decompression on animals. *J. Aviat. Med.*, 1953, 24: 20.
42. Haber F.—On the physical process of explosive decompression. *J. Aviat. Med.*, 1950, 21: 495.
43. Hall F. G.—Pattern of gas expulsion from human lung during rapid decompression. *Fed. Proc.*, 1950, 9: 55.
44. Hamilton W. F., Woodbury R. A., Harper H. T. Jr.—Arterial, cerebrospinal and venous pressures in man during cough and strain. *Amer. J. Physiol.*, 1944, 141: 42.
45. Hansen A. T.—Pressure measurement in the human organism. *Acta. Physiol. Scandinav.*, 1949, 19 (Suppl. 68).
46. Heim J. W.—Physiologic considerations governing high altitudes flight. *J. Aeronaut. Sci.*, 1938, 5: 189.
47. Hitchcock F. A.—Ch. 12: Explosive decompression, in Fulton J. F., Decompression sickness, U.S.N.R.C. Monography. Philadelphia, Saunders, 1951.
48. Hitchcock F. A.—Physiological and pathological effects of explosive decompression. *J. Aviat. Med.*, 1954, 25, 578.
49. Hitchcock F. A., Beman F. M., Kemph J. P.—Estimation of subcutaneous pressure in animals explosively decompressed to pressure of 30 mm Hg. *Fed. Proc.*, 1948, 7: 55.
50. Hitchcock F. A., Edelmann A., Shelden F. F., Whitehorn W. V.—The volume and composition of air expelled from the lungs during explosive decompression. *Fed. Proc.*, 1947, 6: 130.
51. Hitchcock F. A., Edelmann A.—The response of normal dogs to explosive decompression to 30 mm Hg. *Fed. Proc.*, 1947, 6: 130.
52. Hitchcock F. A., Whitehorn W. V., Edelmann A.—Tolerance of normal men to explosive decompression. *J. appl. Physiol.*, 1948, 1: 418.
53. Ivy A. C.—High altitude problems in aviation. *Fed. Proc.*, 1946, 5: 319.
54. Kemph J. P., Burch B. H., Beman F. M., Hitchcock F. A.—Further observations on dogs explosively decompressed to an ambient pressure of 30 mm Hg. *J. Aviat. Med.*, 1954, 25: 107.
55. Kemph J. P., Hitchcock F. A.—Effects of oxygen administration on the survival of dogs explosively decompressed to 30 mm Hg. *Fed. Proc.*, 1949, 8: 85.
56. Kemph J. P., Hitchcock F. A.—Changes in the blood following explosive decompression. *Amer. J. Physiol.*, 1949, 155: 447.
57. Laurent M.—Les accidents de l'aviation aux hautes altitudes. Recherches experimentales sur les décompressions brusques par rupture des cabines étanches. Thèse Med., Paris, 1939, Paris, Vigot, 1939.
58. Livingston R. B.—Addendum to Explosive decompression, in Fulton J. F., Decompression sickness. U.S.N.R.C. Monography, Philadelphia, Saunders, 1951, p. 396.

59. Livingston R. B., Gelfan S., Nims L. F.—Pathology in suddenly decompressed rats. *Fed. Proc.*, 1947, 6: 154.  
 60. Lovelace W. V., Gagge A. P.—Aeromedical aspects of cabin pressurisation for military and commercial aircrafts. *J. Aeronaut. Sci.*, 1946, 13: 143.  
 61. Luft U. C., Clamann H. G., Opitz E.—The latency of hypoxia on exposure to altitude above 50 000 feet. *J. Aviat. Med.*, 1951, 22: 117.  
 62. Mahoney D. I.—Repeted explosive decompressions. *Fed. Proc.*, 1949, 8: 104.  
 63. Monnier A. M., Violette F.—Travail en preparation.  
 64. Rocard Y.—Dynamique générale des vibrations. Paris, Masson. 1949.  
 65. Rocard Y.—Thermodynamique. Paris, Masson, 1950.  
 66. Schuele W.—Technische Thermodynamik, Bd 2. Berlin, Springer, 1923, p. 366.  
 67. Smith J. J.—Effects of explosive decompression on animals, U.S.A.F. Report, 1942.  
 68. Smith J. J.—Physiological and pathological effects of explosive decompression. Thèse de doctorat en Philosophie, Northwestern University, 1946.  
 69. Sweeney H. M.—Explosive decompression. *Air Surg. Bull.*, 1944: 1 (No 10): 1.  
 70. Sweeney H. M., Joffe M. H.—The effects of explosive decompression and the extent to which it has been proven safe for young healthy subjects. *Fed. Proc.*, 1945, 4: 69..  
 71. Vail E. G., Hitchcock F. A.—Effect of explosive decompression on the right and left heart. *Fed. Proc.*, 1949, 8: 168,  
 72. Vail E. G., Hitchcock F. A.—Effect of explosive decompression on the temperature of the lungs. *Amer. J. Physiol.*, 1949, 155: 473.  
 73. Van Lerberghe C., Glansdorff P.—Thermodynamique des gaz humides. Liège, Berenger, 1935.  
 74. Violette F.—Effets circulatoires et respiratoires des décompressions explosives. *J. Physiol.*, Paris, 1952, 44: 345.  
 75. Violette F.—Effets cardiovasculaires de certaines décompressions explosives. *Méd. Aéronaut.*, 1952, 7: 489.  
 76. Violette F.—Recherches sur la loi de décompression dans les décompressions explosives. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 1953, 236: 2213.  
 77. Violette F.—L'expansion des gaz de l'organisme au cours des décompressions explosives. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 1953, 237: 626.  
 78. Violette F.—Recherches sur la loi de décompression pulmonaire dans les décompressions explosives. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 1954, 238: 1735.  
 79. Violette F.—Quelques effets physiologiques des décompressions explosives. *J. Physiol.*, Paris, 1954, 46: 548.  
 80. Violette F.—L'étude des phénomènes rapides en physiologie. *Laboratoires*, 1954 (No 11), 5.  
 81. Walter P. B.—Destructive energy in aircraft pressure cabins. *J. Roy. Aeronaut. Soc.*, 1950, 54: 235.  
 82. Werner A. Y., Gelfan S.—Blood pressure changes following explosive decompressions to extreme altitude. *Fed. Proc.*, 1949, 8: 163.  
 83. Wetterer E.—Eine neue manometrische Sonde mit elektrischer Transmission. *Ztschr. f. Biologie*, 1944, 101 (Neue Folge, 83): 332.

84. Whitehorn W. V.—Circulatory responses to exposure to barometric pressure, of 30 mm Hg. *Fed. Proc.*, 1948, 7:133.
  85. Whitehorn W. V., Lein A., Edelmann A.—The general tolerance and cardiovascular responses of animals to explosive decompression. *Amer. J. Physiol.*, 1946, 147:289.
  86. Whitehorn W. V., Lein A., Edelmann A., Hitchcock F. A.—The effect of explosive decompression on cerebrospinal fluid pressure. *Amer. J. Physiol.*, 1946, 148:253.
  87. Whitehorn W. V., Lein A., Hitchcock F. A.—The effect of binding the abdomen and thorax on pulmonary lesions produced by explosive decompression. *J. Aviat. Med.*, 1947, 18:102.
  88. Whitehorn W. V., Lein A., Hitchcock F. A.—The effect of explosive decompression on the occurrence of intravascular bubbles. *J. Aviat. Med.* 1947, 18:392.
  89. Wiggers C. J., Baker W. R.—A new universal optical manometer. *J. Lab. and Clin. Med.*, 1924, 10:54.
-

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------|
| Предисловие к русскому изданию . . . . .                                      |
| Введение . . . . .                                                            |
| <br>                                                                          |
| Глава I. Исторический обзор . . . . .                                         |
| Первые исследования . . . . .                                                 |
| Немецкие исследования . . . . .                                               |
| Американские исследования . . . . .                                           |
| А. Экспериментальные исследования на животных . . . . .                       |
| Б. Экспериментальные исследования с участием человека . . . . .               |
| В. Совместные исследования Гэге и Свиная . . . . .                            |
| <br>                                                                          |
| Глава II. Техника, используемая для изучения взрывной декомпрессии . . . . .  |
| Техника имитации и регистрации декомпрессии . . . . .                         |
| Техника имитации декомпрессии в кабине самолета . . . . .                     |
| Техника регистрации декомпрессии . . . . .                                    |
| Техника регистрации быстро изменяющихся физиологических процессов . . . . .   |
| Требования к технике регистрации . . . . .                                    |
| Описание регистрирующего прибора . . . . .                                    |
| Техника физиологических исследований . . . . .                                |
| <br>                                                                          |
| Глава III. Закон декомпрессии в кабине при взрывной декомпрессии . . . . .    |
| Экспериментальный закон декомпрессии в кабине и практические выводы . . . . . |
| Закон декомпрессии . . . . .                                                  |
| Скорость декомпрессии . . . . .                                               |
| Плотность газа внутри кабины . . . . .                                        |
| Сравнение экспериментальных и теоретических формул . . . . .                  |
| Свойства коэффициента $K$ . . . . .                                           |
| Изучение коэффициента $K$ . . . . .                                           |
| Изотермный характер расширения газа при истечении его из отверстия . . . . .  |
| Вывод уравнения истечения газа из отверстия . . . . .                         |
| Продолжительность декомпрессии . . . . .                                      |

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Г л а в а IV. Взрыв и расширение газов организма при взрывной декомпрессии . . . . .</b>                                                 | 59  |
| Формула Лавлейса и Гэге . . . . .                                                                                                           | —   |
| Вычисление увеличения объема и показателя политропы газа при быстром расширении . . . . .                                                   | 61  |
| Вычисление при помощи формулы Гульдберга и Моэна                                                                                            | —   |
| Построение графика давление — объем для расширения газов, содержащихся во внутренних органах . . . . .                                      | 62  |
| Приближенный подсчет расширения и показатели политропы . . . . .                                                                            | 67  |
| Обсуждение . . . . .                                                                                                                        | 70  |
| <b>Г л а в а V. Закон декомпрессии в легких при взрывной декомпрессии . . . . .</b>                                                         | 74  |
| Трудности изучения декомпрессии в легких . . . . .                                                                                          | 75  |
| Закон декомпрессии в легких . . . . .                                                                                                       | 77  |
| Физиологический смысл двойного режима истечения газов . . . . .                                                                             | 81  |
| Значение закона декомпрессии в легких для авиации . . . . .                                                                                 | 82  |
| Максимальный коэффициент утечки . . . . .                                                                                                   | —   |
| Применение закона декомпрессии для конструирования герметической кабины с наддувом . . . . .                                                | 83  |
| Декомпрессия в среднем ухе . . . . .                                                                                                        | 84  |
| <b>Г л а в а VI. Давление в легких во время взрывной декомпрессии</b>                                                                       | 87  |
| Результаты киносъемки с большой скоростью . . . . .                                                                                         | 88  |
| Теоретическое изучение внутрилегочного давления в различных режимах . . . . .                                                               | 89  |
| Абсолютное и избыточное давления в легких . . . . .                                                                                         | —   |
| Теоретическое изучение изменения давления внутри легких . . . . .                                                                           | 90  |
| Приблизительный подсчет избыточного внутрилегочного давления . . . . .                                                                      | 93  |
| Принцип сравнения экспериментальных кривых избыточного внутрилегочного давления с теоретическими                                            | 94  |
| Сравнение экспериментальных кривых избыточного внутрилегочного давления с теоретическими . . . . .                                          | 95  |
| Используемая техника . . . . .                                                                                                              | —   |
| Результаты . . . . .                                                                                                                        | —   |
| Обсуждение результатов . . . . .                                                                                                            | 98  |
| <b>Г л а в а VII. Изменения физиологических функций при развитии избыточного давления в легких во время взрывной декомпрессии . . . . .</b> | 101 |
| Изучение записей давления в различных участках тела                                                                                         | 102 |
| Давление в легочной артерии и давление спинномозговой жидкости . . . . .                                                                    | —   |
| Внеплевральное внутригрудное давление и давление в венах . . . . .                                                                          | 105 |
| Давление в сонной артерии . . . . .                                                                                                         | 106 |
| Значение некоторых изменений физиологических функций                                                                                        | 108 |
|                                                                                                                                             | 127 |

Стр

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава VIII. Рациональное определение взрывной декомпрессии . . . . . | 112 |
| Заключение . . . . .                                                 | 115 |
| Литература . . . . .                                                 | 121 |

---

*Ф. Виолетт*

**ВЗРЫВНАЯ ДЕКОМПРЕССИЯ И ЕЕ ДЕЙСТВИЕ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА**  
М. Воениздат, 1961. 128с.

Редактор инженер-полковник *Крылов М. В.*

Технический редактор *Зудина М. П.*

Корректор *Заикина А. Г.*

Сдано в набор 29.12.60 г.

Г-72786.

Подписано к печати 27.4.61 г.

Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub> — 4 печ. л. = 6,56 усл. печ. л. 6,346 уч.-изд. л. Тираж 2500

Изд. Б/2419

Зак. № 2037

2-я типография Военного издательства Министерства обороны Союза ССР  
Ленинград, Д-65, Дворцовая пл., 10

Цена 42 коп.

Цена 42 коп.

СИМВОЛЫ  
ЧИСЛА

10 V