

трубы с малой турбулентностью. Конструктивная схема таких труб не отличается от схемы, изображенной на рис. 3.8. В этих трубах воздух также засасывается из атмосферы, но подвергается более сильному сжатию в коллекторе.

### § 7. Аэродинамические трубы больших скоростей<sup>1)</sup>

При больших дозвуковых и при сверхзвуковых скоростях полета основным правилом динамического подобия является правило Маиевского, согласно которому модель должна испытываться при тех же значениях числа  $M$ , что и натуральный объект. Для испытания моделей при больших скоростях строятся специальные аэродинамические трубы и установки; они позволяют изучать влияние сжимаемости среды на аэродинамические характеристики модели.

Аэродинамические трубы, в которых поток создается непосредственно вращением вентилятора или многоступенчатого осевого компрессора, называются *трубами непрерывного действия*. Однако для получения больших скоростей потока в трубах непрерывного действия требуются затраты больших мощностей (мощность приблизительно пропорциональна кубу скорости потока). Поэтому, наряду с трубами непрерывного действия, получили распространение аэродинамические трубы, не требующие такой большой мощности. В трубах этого типа поток создается разностью давлений между баллонами со сжатым воздухом и атмосферой или атмосферой и вакуумной емкостью, или баллонами со сжатым воздухом и вакуумом. Такие трубы называются *трубами кратковременного действия*, так как в этих случаях поток поддерживается в трубе непродолжительное время (от долей секунды до нескольких минут). При этом сжатие воздуха в баллонах или создание вакуума могут осуществляться компрессорами или вакуумными насосами значительно меньшей мощности, чем это потребовалось бы для трубы непрерывного действия.

Рассмотрим теперь основные типы аэродинамических труб больших скоростей.

#### а) Скоростные трубы переменной плотности

Для одновременного выполнения условий динамического подобия по сжимаемости и вязкости и определения зависимости аэродинамических характеристик летательных аппаратов или их частей от чисел  $M$  и  $R$  используются аэродинамические трубы переменной плотности.

Схема такой трубы дана на рис. 3.10. Изменяя с помощью компрессоров начальное давление в трубе, можно получить различные числа  $R$  модели, а изменяя скорости в рабочей части от малых до больших, можно изучить и влияние сжимаемости. Начальное давление

<sup>1)</sup> Этот параграф написан С. М. Горлиным.

в трубах переменной плотности обычно изменяется в пределах 0,2 — 10 атм, а числа  $M$  — от  $M=0$  до  $M=0,9$ .

Следует отметить, что трубы переменной плотности требуют большой мощности двигателей, а испытываемые в них модели, как и

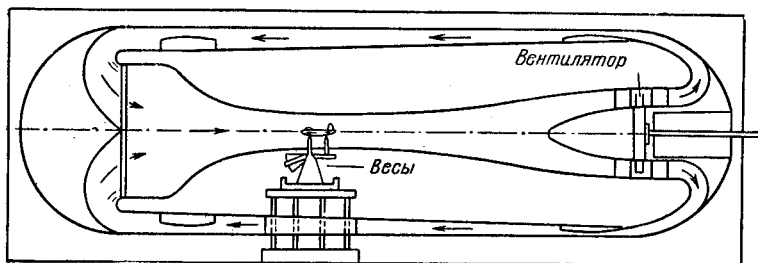


Рис. 3.10. Скоростная аэродинамическая труба переменной плотности.

конструкция трубы, подвергаются значительным аэродинамическим нагрузкам. По этим причинам размеры рабочих частей таких труб редко превосходят 2,5 — 3 м в диаметре.

### б) Трубы околосвуковых скоростей

Трубами околосвуковых скоростей называют трубы со скоростью потока в рабочей части, соответствующей диапазону чисел  $M$  от  $M=0,6$  до  $M=1,4$ . Околосвуковые аэродинамические трубы, как и

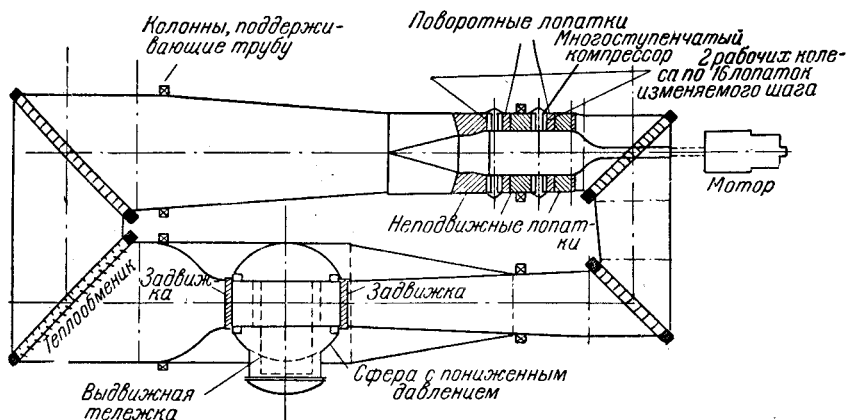


Рис. 3.11. Околосвуковая аэродинамическая труба постоянного (непрерывного) действия.

вообще трубы больших скоростей, бывают постоянного и кратковременного действия. Схема околосвуковой трубы постоянного действия дана на рис. 3.11.

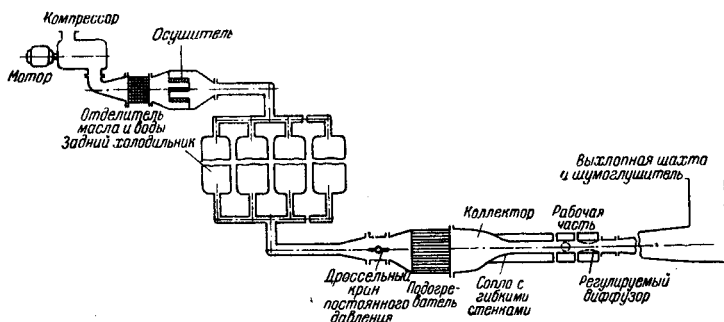


Рис. 3.12. Схема аэродинамической трубы кратковременного действия, работающей от баллонов со сжатым воздухом.

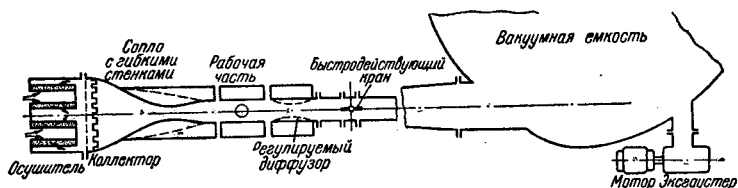


Рис. 3.13. Схема аэродинамической трубы кратковременного действия вакуумного типа.

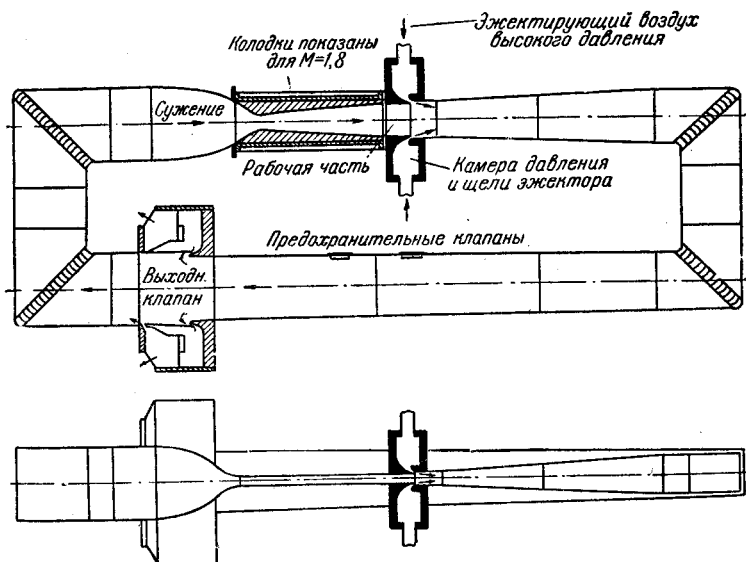


Рис. 3.14. Схема околосзвуковой аэродинамической трубы кратковременного действия эжекторного типа.

Для труб кратковременного действия время работы ограничено запасами сжатого воздуха высокого давления или объемом вакуумных емкостей и практически колеблется в пределах 1—5 мин. Иногда воздух высокого давления в околосвуковых трубах подается не в форкамеру, расположенную перед коллектором, а в эжектор, находящийся за рабочей частью. В этом случае скорость создается за счет разности атмосферного давления и пониженного давления за эжектором.

Схемы околосвуковых труб кратковременного действия даны на рис. 3.12, 3.13, 3.14.

Рабочая часть околосвуковых труб во избежание излишних потерь давления (а следовательно, и мощности) выполняется закрытого типа. Угол раскрытия диффузора выбирается малым,  $\approx 5^\circ$ . При этих условиях, если обеспечен достаточный перепад давлений на входе в сопло и выходе из него, может быть получена в рабочей части скорость, близкая к скорости звука.

Следует, однако, заметить, что поток в рабочей части в окрестности  $M=1$  неустойчив, и необходимо принять ряд мер для того, чтобы было возможным проведение измерений в этой области, которая является критической для аэродинамических характеристик.

При увеличении скорости  $V$  набегающего на тело потока наступает момент, когда при значении  $V$ , меньшем скорости звука, около тела возникают скорости, равные местной скорости звука. Число  $M_\infty$ , соответствующее этой скорости набегающего потока, называют критическим и оно достигает для хорошо обтекаемых тел (профилей, крыльев, фюзеляжей) значения  $0,8 \div 0,85$ . При дальнейшем увеличении скорости набегающего потока и приближении ее к скорости звука сверхзвуковая зона захватывает все тело, за исключением сравнительно малой области на передней части его поверхности. От тела, помещенного в рабочую часть трубы, в направлении к ее стенкам простираются при такой скорости поверхности разрыва давления (скачки уплотнения), которые с ростом скорости достигают стенок и как бы запирают трубу (рис. 3.15). Дальнейшее увеличение скорости в трубе, несмотря на увеличение напора, при этом невозможно вследствие потерь давления в потоке, пересекающем скачки уплотнения. С возрастанием напора скачки уплотнения будут сдвигаться к концу тела, наклоняться, деформироваться и, наконец, будут возникать новые системы скачков (от подвесок модели к стенкам

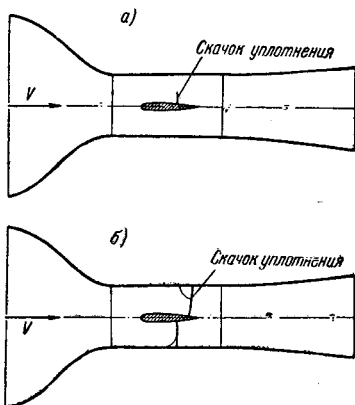


Рис. 3.15. Схема «запирания» скорости в аэродинамической трубе скачками уплотнения: а) возникновение скачки при  $M_\infty > M_{кр}$  не изменяет влияния стенок трубы; б) при  $M_\infty \approx 1$  скачки уплотнения перекрывают рабочую часть и взаимодействуют со стенками трубы.

трубы и т. п.), но скорость перед моделью не увеличится. Запирание может наступить и в трубе без модели в рабочей части, когда скорость, например, на выходе из рабочей части из-за нарастания пограничного слоя станет равной местной скорости звука.

Явления запания, когда они связаны с моделью, делают практически невозможным использование результатов измерений, так как нет способа введения поправок, учитывающих то обстоятельство, что различные части модели и подвесок находятся в совершенно различных условиях, которые в безграничном потоке не будут иметь места. По этим причинам основной трудностью, которую приходится преодолевать при создании околосвуковых труб, является устранение запания.

Если не применять специальных мер, то допустимое число  $M$ , при котором еще не наступает записание, происходящее от загромождения потока в рабочей части трубы, сравнительно невелико (0,7 — 0,75). Уменьшение миделевых размеров модели и подвесок технически возможно только до определенного предела, который равен примерно 2,5 — 3,5% от площади поперечного сечения рабочей части. При этом допустимое число  $M$  равно 0,85. Увеличение размеров рабочей части трубы по сравнению с размерами модели с тем, чтобы загромождение потока моделью составляло не более 1%, является очень дорогостоящим способом. В этом случае, например, для испытания модели самолета с размахом крыльев  $l = 1,5$  м диаметр рабочей части должен быть не менее 4,5 м, а потребляемая мощность при числе  $M = 1$  составит 50 000 квт.

Устройство открытой рабочей части также требует значительной дополнительной мощности. Можно избежать запания трубы устройством рабочей части с перфорированными или щелевыми стенками (рис. 3.16), через которые отводится или отсасывается некоторое количество воздуха из рабочей части, что газодинамически равнозначно расширению сечения (как это имеет место, например, в сопле Лавалья). Таким способом в трубе удается получить устойчивый поток в окрестности  $M = 1$ . Степень перфорации стенок зависит от числа  $M$  и составляет примерно 20% при  $M = 1,2$ . Многочисленные экспериментальные исследования показали, что условия обтекания тел в трубах околосвуковых скоростей с перфорированными стенками рабочей части близки к условиям обтекания этих тел в безграничном потоке, а взаимное влияние модели и трубы существенно уменьшается. Отсос воздуха из рабочей части улучшает также работу диффузора, на входе в который в этом случае будет более тонким пограничный слой.

Трубы околосвуковых скоростей имеют размеры рабочих частей до  $5 \times 5$  м<sup>2</sup>, мощности двигателей для труб непрерывного действия достигают нескольких сот тысяч киловатт. Трубы непрерывного действия снабжаются охлаждательными системами, поддерживающими температуру воздуха в пределах до  $+40 - +50^\circ \text{C}$ , системой

осушки воздуха, позволяющей довести содержание влаги в трубе до 0,5 — 1,0 г на 1 кг воздуха. В трубах кратковременного действия из-за необходимости осушать все новые количества воздуха система осушки воздуха требует большой мощности.

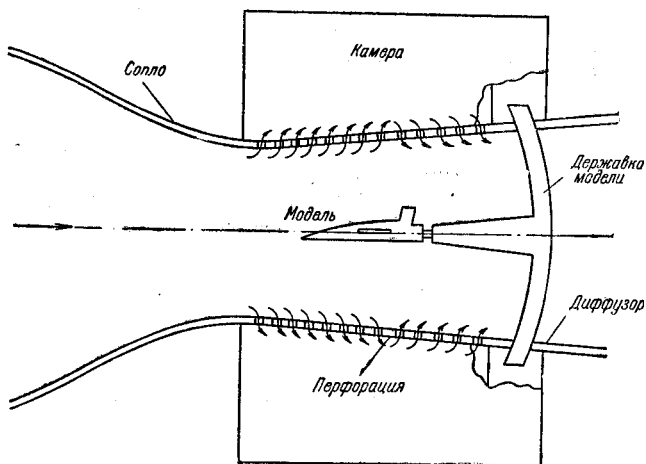


Рис. 3.16. Рабочая часть скоростной аэродинамической трубы с перфорированными стенками.

В современных околозвуковых (и сверхзвуковых) трубах применяются выдвижные рабочие части с моделью, сопла Лавала с гибкими стенками, непрерывно регулирующимися (путем системы нажимов), телевизионное наблюдение за моделью и элементами трубы, автоматическое ведение эксперимента и обработка результатов измерений с помощью счетно-электронных машин.

### в) Сверхзвуковые аэродинамические трубы

В сверхзвуковых аэродинамических трубах скорости потока соответствуют числам  $M$ , большим 1,4.

Сверхзвуковые трубы бывают непрерывного и кратковременного действия и имеют по своему устройству много общего с трубами околозвуковых скоростей. Но в ряде своих элементов сверхзвуковые трубы существенно отличаются от околозвуковых. Требования к соплу и рабочей части, тщательности их расчета и изготовления в сверхзвуковых трубах более жесткие, нежели в околозвуковых трубах. Торможение сверхзвукового потока, выходящего из рабочей части, которое осуществляется в прямом скачке при обычном диффузоре, приводит к огромным потерям мощности. Поэтому в сверхзвуковых трубах такое торможение производится в регулируемых сверхзвуковых диффузорах с помощью системы косых либо косых и прямых

скачков, что значительно снижает потери энергии. Конструктивно сверхзвуковые диффузоры имеют либо регулируемые стенки (рис. 3.17), раздвигающиеся при запуске трубы, либо клин или конус (рис. 3.18),

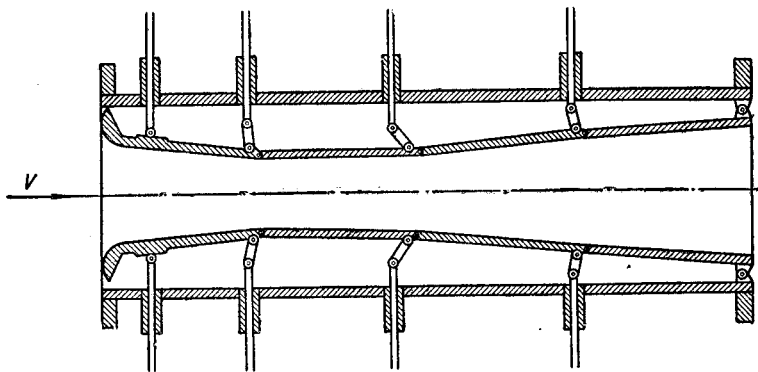


Рис. 3.17. Сверхзвуковой диффузор с регулируемыми стенками.

создающие систему косых скачков. Требования к осушке воздуха в сверхзвуковых трубах такие же, как и в околозвуковых<sup>1)</sup>.

Помимо осушки, в сверхзвуковых трубах необходимо при числе  $M \geq 4$  подогревать воздух во избежание конденсации газов, входящих в его состав. Такой подогрев в чистом виде применяется в трубах кратковременного действия пропусканием воздуха через подогреватели, обычно электрического типа, устанавливаемые перед форкамерой (см. рис. 3.12).

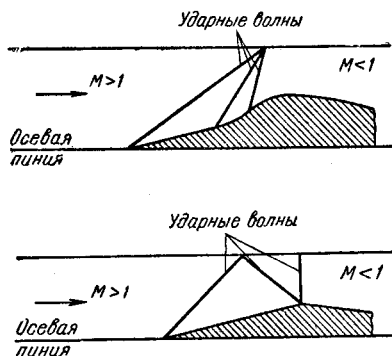


Рис. 3.18. Схемы сверхзвуковых диффузоров с клином или конусом.

В сверхзвуковых трубах постоянного действия, т. е. замкнутого типа, температура воздуха, из-за подводимой к нему энергии компрессоров, все время возрастает, что затрудняет измерения и усложняет нормальную работу аппаратуры, электродвигателей, подшипников и т. п.

Так, например, температура воздуха в зоне компрессоров достигает  $200 - 350^\circ \text{C}$  и поэтому без охлаждения такие сверхзвуковые трубы работать не могут. Охлаждение потока в замкнутых сверхзвуковых трубах производится путем установки в обратном канале, где скорость

<sup>1)</sup> Особую трудность представляет при этом осушка воздуха в трубах вакуумного типа и трубах для испытаний реактивных двигателей, в которых осуществляется непрерывная подача свежего воздуха. Так, например, при размере рабочей части  $3 \times 3$  м и скорости, соответствующей числу  $M = 3,5$ , необходимо абсорбировать из потока до 1500 кг воды в минуту.

мала, специальных жидкостных охладителей, достигающих весьма значительных размеров<sup>1)</sup>.

Современные трубы сверхзвуковых скоростей постоянного действия (рис. 3.19) в качестве обязательных элементов имеют: регулируемое сопло Лавала, сверхзвуковой диффузор, охладитель, осушительную установку, подогреватель и регулируемый привод. В качестве привода обычно используют электродвигатели, вращающие

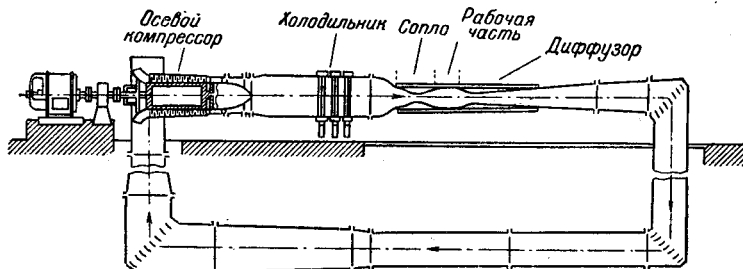


Рис. 3.19. Сверхзвуковая аэродинамическая труба непрерывного действия.

многоступенчатые компрессоры с высокой степенью сжатия. Наибольшие скорости, достигнутые в таких трубах, соответствуют числам  $M = 10 - 12$ . Наибольшие скорости получают в трубах кратковременного действия комбинированного типа, в которых воздух

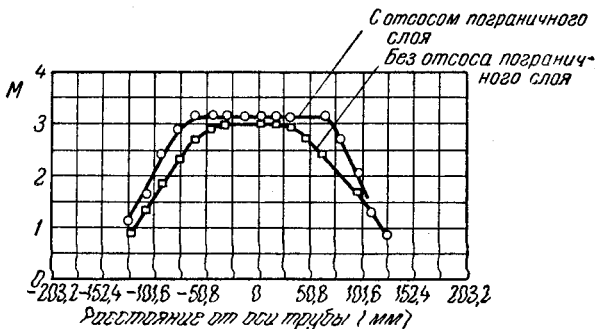


Рис. 3.20. Сравнение поля скоростей в рабочей части аэродинамической трубы малой плотности при отсосе пограничного слоя через стенки сопла и без отсоса.

повышенного давления подается в форкамеру, а диффузор присоединен к вакуумной емкости с пониженным давлением. Так, например, при давлении в форкамере, равном  $50 \text{ атм}$ , а в вакуумной емкости —  $0,01 \text{ атм}$ , скорость воздушной среды соответствует числу  $M = 7$ ; при использовании вместо воздуха ксенона  $M = 11$  и криптона —  $M = 17$ .

<sup>1)</sup> В трубе АЕСД (США) при  $M = 1,6$ , мощности привода в  $216\,000 \text{ л. с.}$  и размерах рабочей части  $4,88 \times 4,88 \text{ м}^2$  поверхность охладительной системы равна  $950 \text{ м}^2$  и расход воды при средней температуре  $22^\circ \text{ С}$  равен  $40 \text{ м}^3/\text{мин}$ .



Для изучения явлений, связанных с проблемами полета на больших высотах, сооружают скоростные трубы с разреженным потоком. При создании таких труб возникают две основные трудности: получение потребной степени разрежения и обеспечение достаточно равномерного поля скоростей в рабочей части. Получение глубокого вакуума — до  $10^{-3}$  —  $10^{-6}$  мм рт. ст. возможно с помощью масляно-диффузионных насосов и форвакуумных насосов. Сохранение вакуума требует тщательной герметизации трубы и ее соединений, очистки всех внутренних поверхностей и т. п.

Равномерное распределение скоростей в рабочей части достигается или отсосом пограничного слоя через стенки сопла (рис. 3.20), или увеличением размеров сопла.

### г) Установки для получения больших сверхзвуковых скоростей

Для получения больших сверхзвуковых скоростей в трубах обычного типа требуются огромные перепады давления, сложные системы подогрева воздуха и охлаждения стенок сопла. По этим причинам в области больших сверхзвуковых скоростей нашли применение экспериментальные установки другого типа. К ним относятся ударные установки и трубы, аэродинамические тире, трубы свободного полета, плазменные аэродинамические трубы и другие.

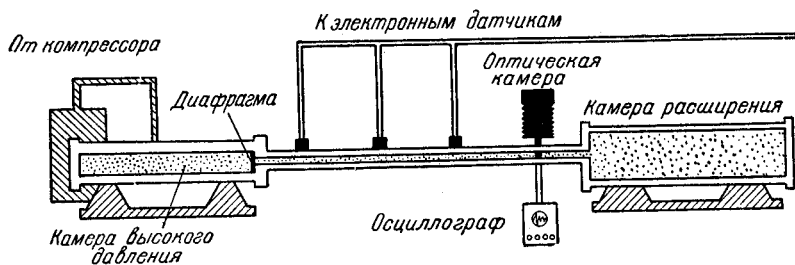


Рис. 3.21. Схема ударной установки.

**Ударные установки и ударные аэродинамические трубы.** Ударная установка (труба) представляет собой длинную трубу, закрытую с обоих концов и разделенную перегородкой (диафрагмой) на два неравных отсека. В первом, малом, отсеке газ находится под большим давлением (до 6000 — 7000 атм); во втором отсеке, занимающем до 60 — 75% всей длины, давление значительно понижено против давления в первом отсеке, а иногда даже против атмосферного. При разрушении диафрагмы с помощью взрыва возникает прямая ударная волна, распространяющаяся в область низкого давления. За ударной волной движение сохраняется в течение весьма короткого времени ( $10^{-2}$  —  $10^{-6}$  сек.), и таким образом, установка

может быть использована в качестве аэродинамической трубы с очень малым временем действия. По этой же причине ударные трубы требуют применения особой безынерционной быстродействующей измерительной аппаратуры, позволяющей измерять в указанные отрезки времени быстроменяющиеся давления, температуры и фотографировать картину течения. На рис. 3.21 дана схема ударной установки, а на рис. 3.22 — примерная зависимость времени течения от числа  $M$

для ударной трубы. В ударных установках вместо воздуха иногда применяют горючую смесь из кислорода и водорода с добавлением гелия или азота. Взрыв осуществляется путем подачи в сжатый газ сильного электрического разряда.

Схема течения в ударной трубе по фотографиям, сделанной скоростной камерой, представляется в следующем виде.

Вслед за разрывом диафрагмы ударная волна, двигаясь в область низкого давления, достигает закрытого дна и, отражаясь от него, идет обратно. На обратном пути эта волна проходит такие сечения трубы, в которых уже развился пограничный слой и, взаимодействуя с ним, тормозится, образуя зону сжатия; повышение давления и температуры в этой зоне используется в ударных аэродинамических трубах для дальнейшего увеличения числа  $M$ .

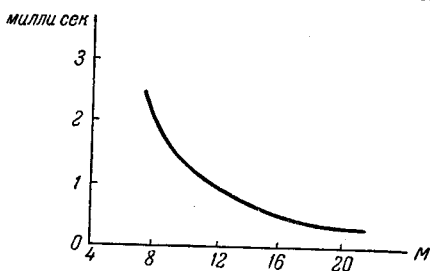


Рис. 3.22. Зависимость времени течения в ударной трубе от числа  $M$ .

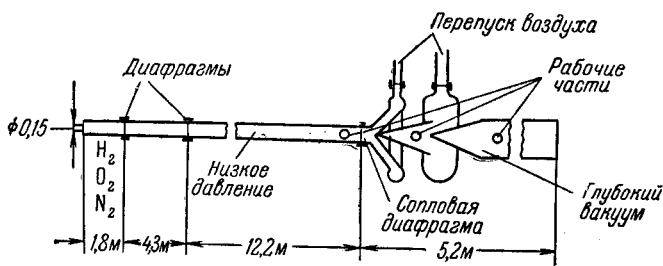


Рис. 3.23. Схема ударной аэродинамической трубы.

Ударная аэродинамическая труба представляет собой ударную установку с присоединенной системой расширительных сопел на конце.

Показанная на рис. 3.23 ударная аэродинамическая труба (Англия) имеет три рабочие части ( $M=7$ ,  $M=20$  и  $M=40$ ). В ударных аэродинамических трубах для увеличения числа  $M$  вместо воздуха используют и другие рабочие среды (например, гелий), у которых скорость звука меньше, нежели у воздуха. При наличии приборов

микросекундного действия в ударных установках и ударных аэродинамических трубах возможно изучение не только сверхзвуковых течений, но и исследование при сравнительно высоких температурах распространения возмущений в ионизированных газах, переходных процессов за ударными волнами и т. п.

*Аэродинамические тир.* Аэродинамический тир или баллистическая установка представляет собой сооружение для исследования аэродинамических характеристик различного рода тел в начальный момент свободного полета при стрельбе под малыми углами возвышения. В этом случае траектория полета близка к траектории полета тел, движущихся под действием силы тяжести и сопротивления.

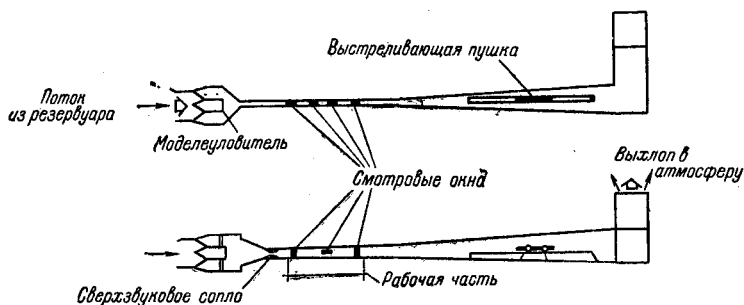


Рис. 3.24. Схема сверхзвуковой трубы со свободным полетом модели.

Методика испытания на этих установках состоит обычно в фотографировании положения тела при его движении через установку<sup>1)</sup> и определении времени полета между двумя фиксированными точками.

Приведение в движение моделей в большинстве установок производится путем взрыва нитроклетчатки либо с помощью горючей смеси из водорода и кислорода. Наибольшие скорости, достигнутые в последнее время в баллистических установках, не превосходят 4—7 км/сек.

*Сверхзвуковые трубы со свободным полетом модели.* Сверхзвуковая труба свободного полета (рис. 3.24) представляет собой обычную сверхзвуковую трубу с размещенной в диффузоре баллистической установкой. При опыте модель выстреливается против набегающего потока; тогда скорость модели относительно неподвижного воздуха будет равна сумме скоростей потока в рабочей части и скорости модели относительно стенок рабочей части; сложение этих скоростей позволяет получить большие числа  $M$  и  $R$  в опытах. Методика измерений в трубах свободного полета аналогична методике измерений на баллистических установках.

<sup>1)</sup> Для фотографирования быстро движущихся моделей пользуются искровым методом освещения или собственным свечением тел при больших скоростях их обтекания.

**Плазменные аэродинамические трубы.** Для создания и исследования высокоскоростных и высокотемпературных потоков газа в последнее время интенсивно используются плазменные струи, получаемые с помощью специальных электродуговых устройств (рис. 3.25).

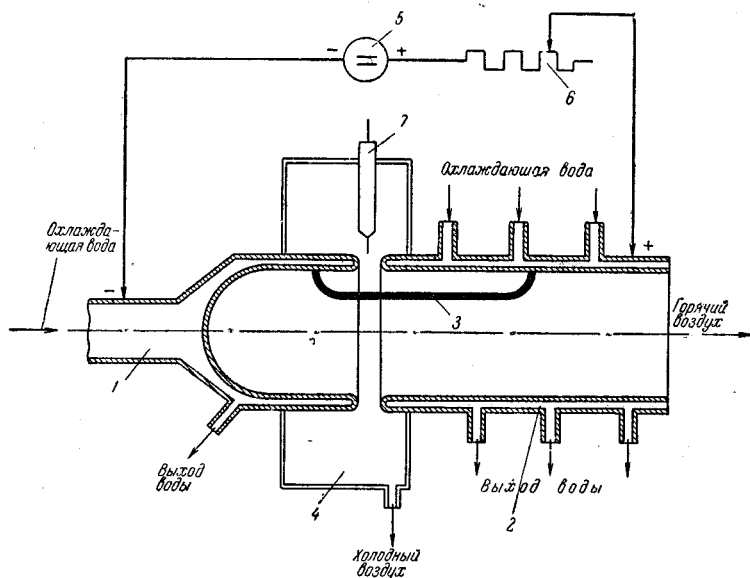


Рис. 3.25. Схема плазменной аэродинамической трубы.

1 — катод, охлаждаемый водой; 2 — анод, также охлаждаемый водой; 3 — электрическая дуга, подогревающая воздух, подаваемый из вихревой камеры 4, до высокой температуры. Плазматрон питается от генератора постоянного тока 5 через реостат 6, необходимый для стабилизации режима горения дуги. Зажигание дуги осуществляется от специального разрядника 7.

При включении дуги поток плазмы высокой плотности выталкивается электромагнитными силами из кольцеобразного отверстия катода в виде струи с температурой  $10\,000 - 15\,000^\circ\text{C}$  и более.

Эта струя, будучи помещена в сверхзвуковое сопло с интенсивно охлаждаемыми стенками, связанное с вакуумной камерой, позволяет получить большие сверхзвуковые скорости при высоких температурах газа.

## § 8. Экспериментальное определение давлений и касательных напряжений на поверхности тела

Мы рассмотрим в этом параграфе наиболее часто применяющиеся способы экспериментального определения нормальных и касательных напряжений на поверхности тела, движущегося в воздушной среде или обтекаемого потоком среды.

Для измерения нормальных напряжений (давлений) делают на поверхности тела небольшие отверстия (диаметром приблизительно