

## ФИЗИКА ВОЗДУШНЫХ НАЛЁТОВ

*Дж. Д. Бернал*<sup>1)</sup>

Область, рассматриваемая в этой лекции ограничена только одной из сторон воздушных налётов, а именно, действиями, производимыми фугасными бомбами. Большое количество физических проблем возникает в связи с другими аспектами воздушных налётов, например, в части возникновения пожаров; однако, эти вопросы не столь далеки от нашего повседневного опыта, как вопросы, касающиеся эффектов, вызываемых взрывами бомб.

Устрашающее действие фугасных бомб в значительной степени связано с недостаточным знанием процессов, происходящих при разрывах этих бомб. Совершенно естественно, что изучение явлений, протекающих со скоростями взрывов, является затруднительным, однако, оно всё же возможно; благодаря работам физиков многих стран, а в особенности английских физиков во время войны (главным образом в лаборатории Управления научных и промышленных исследований), мы можем сказать, что основные черты физических процессов, связанных со взрывом, вырисовываются уже довольно отчётливо. Конечно, вследствие сложности явления, а также вследствие требований секретности в настоящей статье мы можем наметить лишь общие контуры результатов этих исследований.

Действие всех взрывчатых веществ основано на освобождении энергии в течение весьма коротких промежутков времени. Выделяемые количества энергии велики, но они не превосходят существенно количества, выделяемых при обычном производстве энергии. Если отнести к единице массы, то взрывчатые вещества содержат почти не больше энергии, чем уголь или бензин, но в то время как 10 галлонов бензина могут приводить в движение мотор в продолжение 5 часов, такое же количество взрывчатого вещества (примерно содержащееся в 50-килограммовой немецкой бомбе) освобождает свою энергию в течение  $1/20\,000$  сек. В соответствии с этим мощность, выделенная при взрыве, оказывается во много раз больше. Другим следствием краткости интервала выделения энергии является то, что много более важными, чем термические, являются механические эффекты разрывов. Взрыв является весьма эффективным способом преобразования химической энергии в механиче-

<sup>1)</sup> Лекция, прочитанная 3 декабря 1940 г. в Королевском институте Великобритании, Proceedings of the Royal Institution of Great Britain, 31, 262, 1941, Перевод А. А. Ильиной.

скую при весьма малых потерях в виде тепла. К несчастью, в военное время во всяком случае, все механические эффекты имеют разрушительный характер.

Огромная скорость выделения энергии, заключённой во взрывчатом веществе, означает, что действие, производимое на окружающие тела, будь они твёрдые, жидкие или газообразные, не определяется их обычными механическими свойствами. При рассмотрении взрывов простые статические давления почти не имеют значения и существенными оказываются только динамические свойства материалов. В общем это сказывается в увеличении сопротивляемости материалов. Большинство материалов имеет гораздо большую сопротивляемость по отношению к внезапным нагрузкам по сравнению с обнаруживаемой при постепенном увеличении напряжений; но напряжения, возникающие при взрывах, по крайней мере вблизи от места взрыва, оказываются много больше тех, которые могут быть осуществлены в лабораториях, и в сущности, они могут быть изучены лишь в связи со взрывами.

Большую часть действий взрывчатых веществ на окружающую среду можно хорошо объяснить, если считать, что взрывчатые вещества образуют волну исключительной интенсивности, распространяющуюся с очень большой скоростью через тела. Обычное механическое возмущение передаётся в веществе со скоростью звука. Эта последняя определяется квадратным корнем из отношения плотности тела к его упругости. Если плотность велика, а упругость мала, — волна распространяется медленно и наоборот. Границами этих скоростей будут  $150 \text{ м/сек}$  в газообразном четырёххлористом углероде и  $5000 \text{ м/сек}$  в стали. Вследствие высоких давлений, развивающихся в месте взрыва, скорости получаются гораздо большие. Это происходит вследствие зависимости упругости тела от давления; внутренние слои атома более упруги, чем внешние. При сильном сжатии упругость возрастает, и скорость распространения волны увеличивается. Это возрастание скорости более заметно в газах, чем в твёрдых телах или в жидкостях. Так, например, скорость звука в воде может меняться от  $1825 \text{ м/сек}$  до  $3650 \text{ м/сек}$  вблизи взрыва; соответствующие цифры для скорости звука в воздухе будут варьировать от  $330$  до  $6000 \text{ м/сек}$ .

При этом характер самой волны будет меняться. Волны высокого давления не имеют плавной формы обычных звуковых волн. Действительно, давление в волновом фронте возрастает мгновенно до своего максимума и затем постепенно падает, проходя через значения, меньшие атмосферного давления, или фазу «всасывания» (suction) (рис. 1).

Образование этой волны с крутым фронтом, или ударной волны, напоминает возникновение береговых волн в море; фаза высокого давления, всегда передаваемая быстрее, чем фаза низкого давления, образует фронт именно как вершину береговой волны, которая задерживается меньше, чем её основание, испытывающее трение о грунт. Эта вершина движется вперёд и, опрокидываясь, разрушает волну. Ударная волна всегда разрушается, так как фронтовые её части теряют энергию быстрее последующих частей, вследствие чего по мере распро-

странения волны её фронтальная часть снижается всё больше и больше и вся волна вырождается в обычную звуковую волну.

Ударная волна в воздухе является именно тем, что мы обычно называем взрывом; ею обуславливается бо́льшая часть побочных явлений,

связанных с воздушным налётом, как, например, разрушение окон. Давления, нужные для того чтобы выдавить оконные стёкла, не особенно велики. Давление  $60-600 \text{ г/см}^2$

(6 атм.) достаточно, чтобы стать опасным для человека. Это может случиться только в непосредственной близости к месту взрыва, так что на самом деле непосредственное поражение взрывом людей случается сравнительно редко. Ударная волна, однако, не является только увеличением давления; непосредственно за фронтом воздух движется вперёд, создавая начальный толчок. Он сопровождается последующим обратным толчком. Эти резкие колебания воздуха могут перемещать свободные предметы, валить людей и т. д. Бо́льшая часть повреждений при взрывах является именно вторичным эффектом в этом смысле и обычно не так серьёзна.

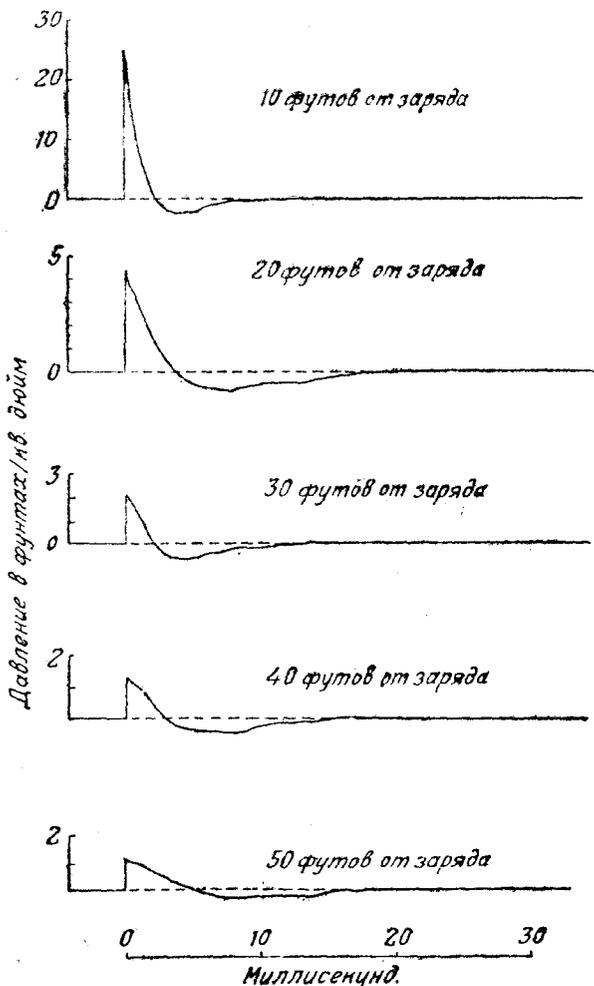


Рис. 1. Кривые давление — время для взрыва заряда в 2 фунта взрывчатого вещества

По причине относительно малых давлений, с которыми приходится иметь дело в случае взрывных волн в воздухе, именно в этом случае наибольших успехов достигают предохранительные меры, в особенности когда дело идёт о таких лёгких структурах, как окна. Оказалось возможным определить путём вычисления эффективную прочность материалов в отношении их сопротивления взрывным волнам. Это определение

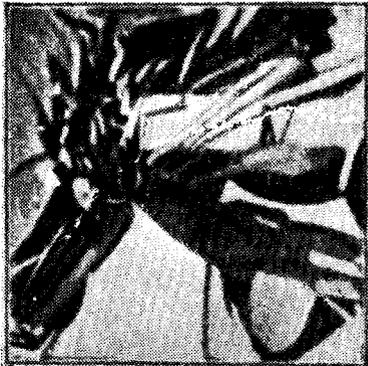
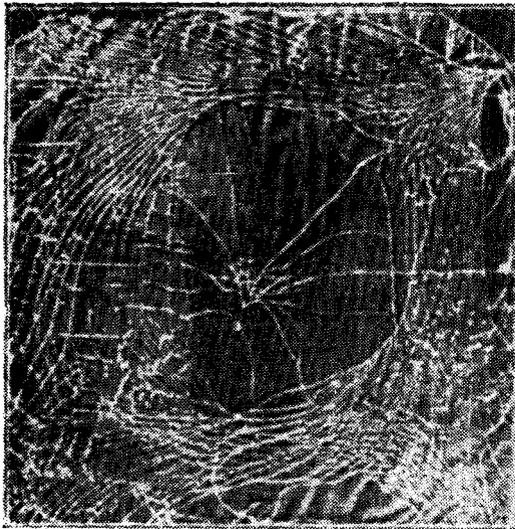
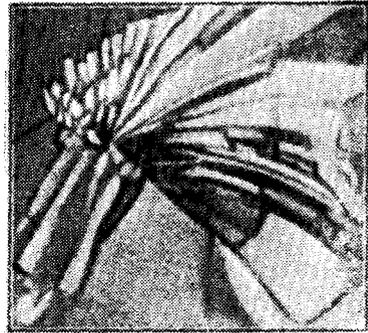
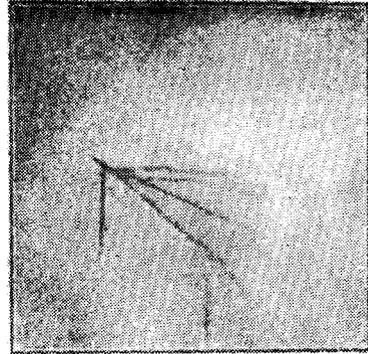
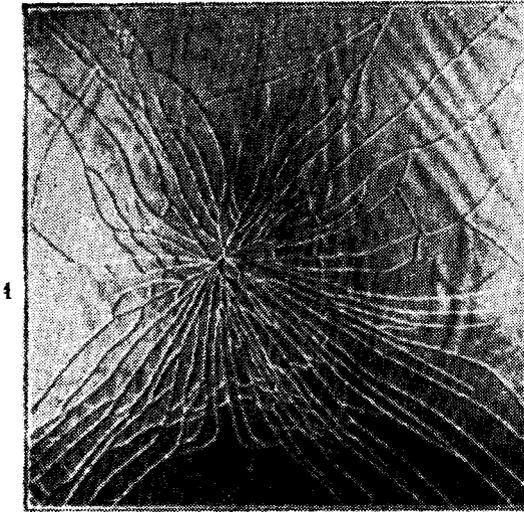
не является простым делом, так как поведение упругой структуры в отношении ударной волны зависит не только от характера последней, но также и от упругих свойств самой структуры. Ударная волна, встречая препятствие, подобное окну, приводит его в колебание, и результирующий эффект оказывается зависящим от соотношения между собственным периодом окна и временными характеристиками волны.

Для любой волны и для любой известной структуры эффективное давление может быть приведено к некоторому статическому давлению, создающему тот же эффект. Это давление известно под названием «эквивалентного статического давления» (рис. 2). То обстоятельство, что действие волны зависит от упругих свойств препятствия, проявляется в различном поведении разных окон и дверей, находящихся на одинаковом расстоянии от места взрыва. Одно окно может быть выбито, в то время как соседнее останется целым только по той причине, что оно имеет иной собственный период. Поведение окон в отношении взрывных волн хорошо иллюстрируется прилагаемыми фотографиями (см. вкладку). Когда взрыв происходит далеко от окна, стекло сначала изгибается в направлении ударной волны, затем движется в обратную сторону и трескается (если оно вообще трескается), так что осколки вылетают наружу. В случае более близкого взрыва стекло трескается при первом движении, и осколки летят внутрь здания. Когда взрыв произошёл весьма близко, окно совершает колебания с частотой одной из гармоник и растрескивается периферия стекла, причём средняя часть часто остаётся совершенно целой до тех пор, пока не разобьётся при ударе о какое-либо препятствие (вкладка, рис. В).

Можно было бы думать, что окна могли бы быть защищены путём увеличения их прочности. К несчастью, однако, почти все приёмы упрочнения окон одновременно дают увеличение их собственных частот, а следовательно, и эквивалентного статического давления, так что, поскольку оба эффекта обычно почти уравнивают один другой, получается лишь иллюзия увеличения прочности. В действительности почти ничего нельзя сделать для предотвращения растрескивания стёкол, но очень многое можно сделать в отношении предотвращения разлетаания осколков.

Кинематографическое изучение процесса разрушения оконных стёкол при взрывах показало высокую полезность таких предохранительных приспособлений, как прозрачные вязкие плёнки и сетки.

Причудливое действие взрыва на окна зависит не только от большого разнообразия в размерах окон. Ударная волна ведёт себя подобно другим волнам: она может отражаться с большим или меньшим поглощением, в зависимости от того, что она поражает. На улицах, особенно с высокими домами, это отражение будет сложным. Взрыв бомбы вызывает ряд отражённых волн, которые на значительном расстоянии от места взрыва сложатся в периодическое возмущение. Стёкла, собственная частота которых совпадает с частотой этого возмущения, будут разрушены вследствие резонанса. Вследствие такого эффекта отдельные окна могут вылетать на большом расстоянии от места взрыва.



*A.* Радиальное растрескивание. Взрыв на умеренном расстоянии.  
*B.* Круговое растрескивание. Вблизи от взрыва.

Кадры из кинематограммы лопающегося окна:

*C.* 0,03 сек. после взрыва. Первое появление трещин.  
*D.* 0,01 сек. спустя. Радиальные трещины полностью развились. Малые осколки вылетают.

*E.* 0,08 сек. спустя. Осколки увлекаются по направлению к бомбе

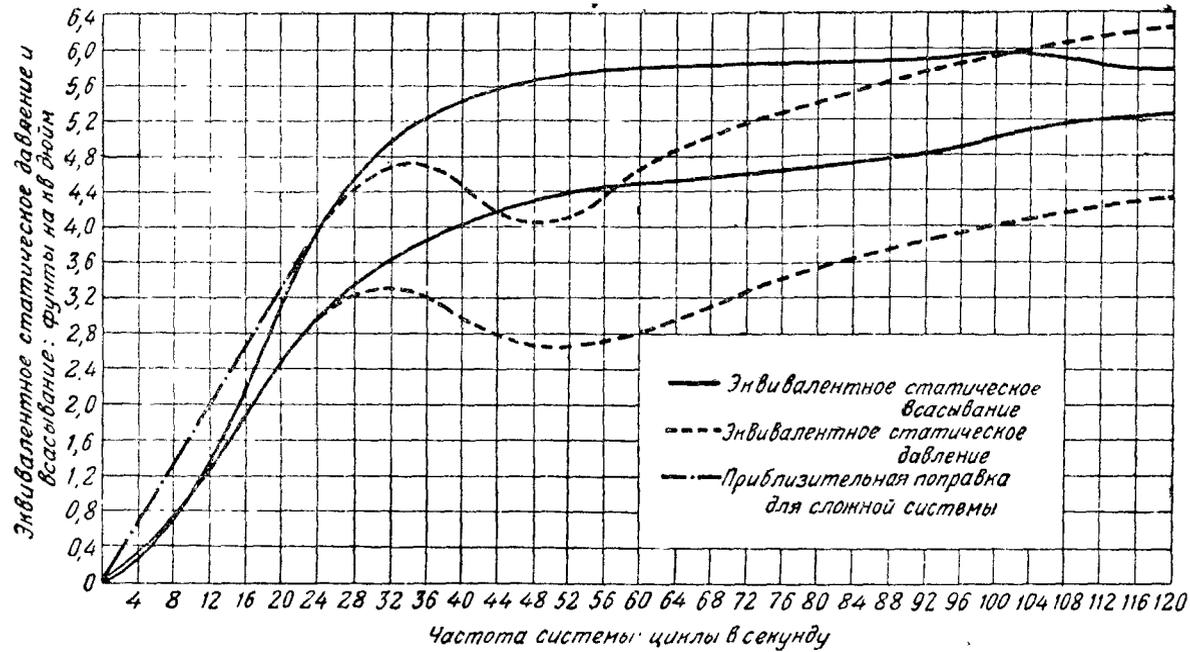


Рис. 2.

Другой своеобразный эффект связан с тем, что ударная волна в узкой улице отражается от её верхней открытой части. Хорошо известно, что волна сжатия, распространяющаяся в трубе с открытым концом, достигая его, вызывает отражённую всасывающую волну. Если это происходит на улице, то отражённая всасывающая волна может оказаться более сильной, чем первичная всасывающая волна самой бомбы. Она может действовать на окна и двери, обрушивая их на улицу.

Ударная волна ведёт себя характерным образом в отношении ограниченных препятствий. Обычные звуковые волны образуют «тени» только позади больших препятствий, как, например, холмов или высоких домов, так как длины волн имеют значения 3—30 м. Ударную волну можно рассматривать как сумму некоторого количества волн различных длин. Часть, связанная с фронтом волны, имеет очень малую длину волны, а хвостовая, всасывающая, связана с большей длиной волны. Вследствие этого ударная волна, проходящая через отверстие или огибающая препятствие, меняется. Грубо говоря, волна давления распространяется прямо и образует тень, в то время как обратная всасывающая часть волны распространяется во все стороны, легко огибая углы. Поэтому позади препятствий компрессионная часть ударной волны может уменьшаться до 0,1 своей величины, сравниваясь по интенсивности с всасывающей частью её. Это обстоятельство является чрезвычайно благоприятным, так как в результате исследований было показано, что именно компрессионная часть ударной волны наиболее вредна для живого организма. Таким образом, укрывшись за небольшой садовой стеной, можно обезопасить себя от прямого действия взрыва. С другой стороны, открытая дверь является опасной и, защищая входы в убежища, мы предохраняем себя как от осколков, так и от взрывной волны.

Страх, вызываемый бомбами, в значительной степени связан со слухами о большом количестве людей, убитых на далёких расстояниях без внешних повреждений, — мистическим эффектом самого взрыва. Исследования показали, что эффект взрывной волны является простым ударом о предмет. В основном эффект взрыва сильнее всего действует на полости нашего тела — особенно на лёгкие, вызывая в них ушибы, кровоподтёки. Это действие связано лишь с компрессионной частью волны, — всасывающая часть не оказывает влияния. К счастью, лёгкие могут выдерживать большое количество ушибов без длительного повреждения и, хотя известно значительное число случаев поражения взрывами, большинство их оканчивалось благополучно. Поражения лёгких можно было рассматривать как неинфекционные пневмонии и лечение их сводилось к постельному содержанию больного в течение некоторого времени.

Помимо взрывной волны поражения могут происходить от осколков и от ударов о землю. Когда бомба разрывается, то её оболочка сначала раздувается и затем взламывается, так же как это происходит при разрушениях газовых баллонов при исключительно высоких давлениях. Разрыв получается при натяжении вдоль плоскостей, расположенных под углом 45° к поверхности бомбы; в результате разрыва получают осколки, выбрасываемые расширяющимися газами. Эти осколки приобре-

тают большие скорости (до 100 м/сек), благодаря чему их пробивная способность также велика. Размеры осколков колеблются от глыб, весом в 18 кг, до размеров мельчайших песчинок. В результате опытов, поставленных в широком масштабе с начала настоящей войны, мы поняли механизм пробивного действия осколков и научились защищаться от них. К счастью, наиболее дешёвые материалы оказались достаточно эффективными в этом отношении. Так, например, слой песка, толщиной в 1 м, защищает от небольших осколков, обычно встречающихся на практике, и  $\frac{1}{3}$  м кирпичной кладки достаточна для защиты от всех осколков, кроме самых крупных.

Этого, однако, не всегда достаточно для того, чтобы устранить поражения, вызываемые осколками. Дело в том, что всякий быстро летящий предмет, ударяясь о препятствие, не только проникает в него. Помимо этого он создаёт внутри препятствия ударную волну, которая, отражаясь от противоположной поверхности, может вызвать на ней появление трещин и вырывание отдельных кусков, которые, если они летят с достаточной скоростью, могут причинить серьёзные повреждения. Это вырывание можно предотвратить путём покрытия стен изнутри материалами с высокой прочностью на разрыв, как, например, стальные листы или даже стальная сетка.

Только часть бомб взрывается на поверхности — на мостовых или на тротуарах улиц и т. д. Большинство же их проникает в здания или в грунт. Бомбы, взрывающиеся в земле, оставляют воронки, диаметром в 6—12 м, в зависимости от размеров бомбы и свойств грунта. Поражения, наносимые при этом, связаны со взрывной волной в земле. Когда бомба взрывается в плотной среде, как, например, в земле, она даёт ударную волну, распространяющуюся с различной скоростью в разных грунтах. Если сверху грунт более податлив, чем в глубине, ударная волна будет распространяться сложным образом. Она отразится от ниже лежащих слоёв и на некотором расстоянии даст уже сложную последовательность волн, напоминающих волны землетрясения. Эти волны могут воздействовать на строения несколько причудливым образом, зависящим от соотношения между собственной частотой здания и частотой волны; однако, повреждения будут вызваны только в очень старых или плохо построенных зданиях.

Наиболее тяжёлые повреждения вблизи фугасных бомб, разорвавшихся в грунте, связаны не с ударной волной, а с действительным движением почвы вблизи места взрыва. При разрыве бомбы взрывные газы, действуя на окружающий грунт, образуют первичную камеру расширения. Земля сдвигается во вне, и действительно происходит значительное смещение, частью упругое, частью неупругое. Земля может сместиться на несколько сантиметров и не вернуться точно на прежнее место, хотя остаточная деформация будет невелика (рис. 3). Эти движения грунта, конечно, наиболее опасны для подземных сооружений. По своему характеру это движение не является, однако, мгновенным толчком, так как здесь продолжительность постоянного давления имеет порядок 0,1 сек. Это не столь уже опасно для сооружений, которые могут выдерживать подобные давления без разрушения.

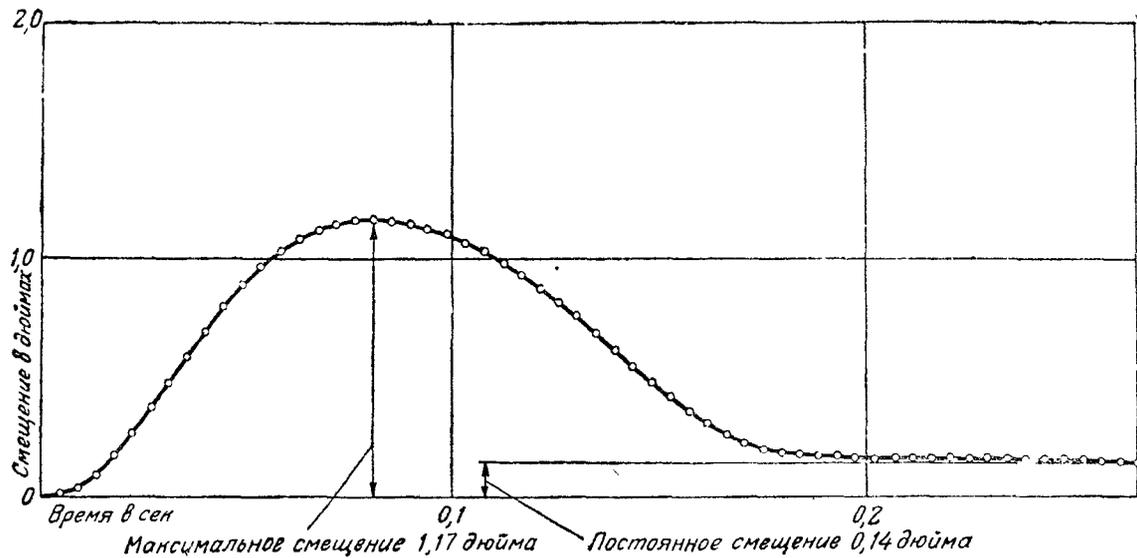


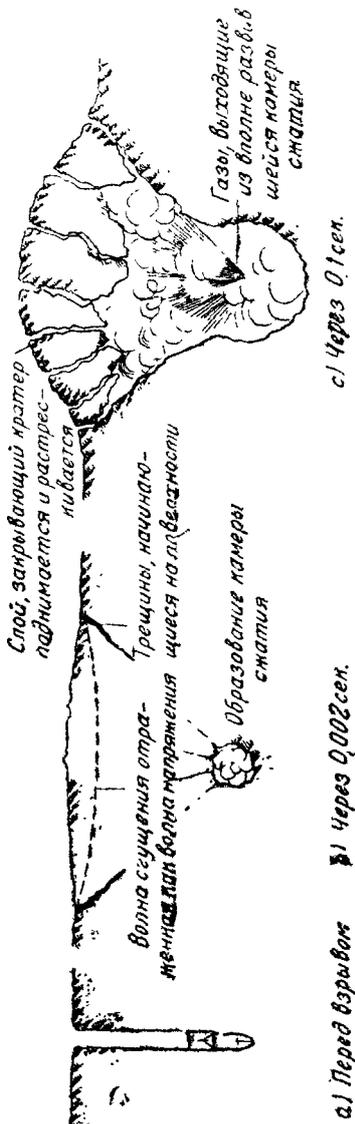
Рис. 3. Запись смещения.

С движением грунта, вызываемым взрывными газами, связаны обычно повреждения газовой и водопроводной сети.

Ударная волна бомбы, разорвавшейся в земле, достигает поверхности и отражается, как волна напряжения. Если она достаточно интенсивна, то происходит растрескивание почвы и конус земли выбрасывается вверх, распадаясь на отдельные части и оставляя за собой характерный кратер. Наблюдаемая картина всегда усложняется наличием упавших обратно обломков. Действительный кратер обычно бывает почти вдвое более глубоким. Если бомба проникает очень глубоко, то разрушений на поверхности не происходит — земля просто вспучивается вверх и оседает обратно. Это так называемый «камуфлет» (подземный взрыв). Такие камуфлеты не имеют большого значения, за исключением тех случаев, когда они могут быть спутаны с невзорвавшимися бомбами (рис. 4а — 4б).

При ударе бомбы в здание эффект взрыва будет сложным, однако он связан с небольшим числом факторов. В этом случае первичным эффектом взрыва будет действие ударной волны, встречающейся со стенами и обрушивающей их. Эффект получается более сильным, чем при открытом взрыве, потому что при отражении волн действие их будет складываться с начальным взрывом, производя более длительное давление и соответственно больший внешний момент.

Исключая просторные помещения (вокзалы, ангары), давление взрыва достаточно для того, чтобы разрушить стены и перекрытия, взметнув их и оголив строение. То, что происходит дальше, зависит от типа постройки. В благоприятном случае результатом взрыва будет образование проломов в стенах. Гораздо чаще повреждение стен ведёт к частичному или полному разрушению здания. В строениях со стальной конструкцией или железобетонных сооружениях остов не разрушается и предотвращает падение верхних частей строения, выдерживая



с) Через 0,1 сек.

б) Через 0,002 сек.

а) Перед взрывом

Рис. 4а

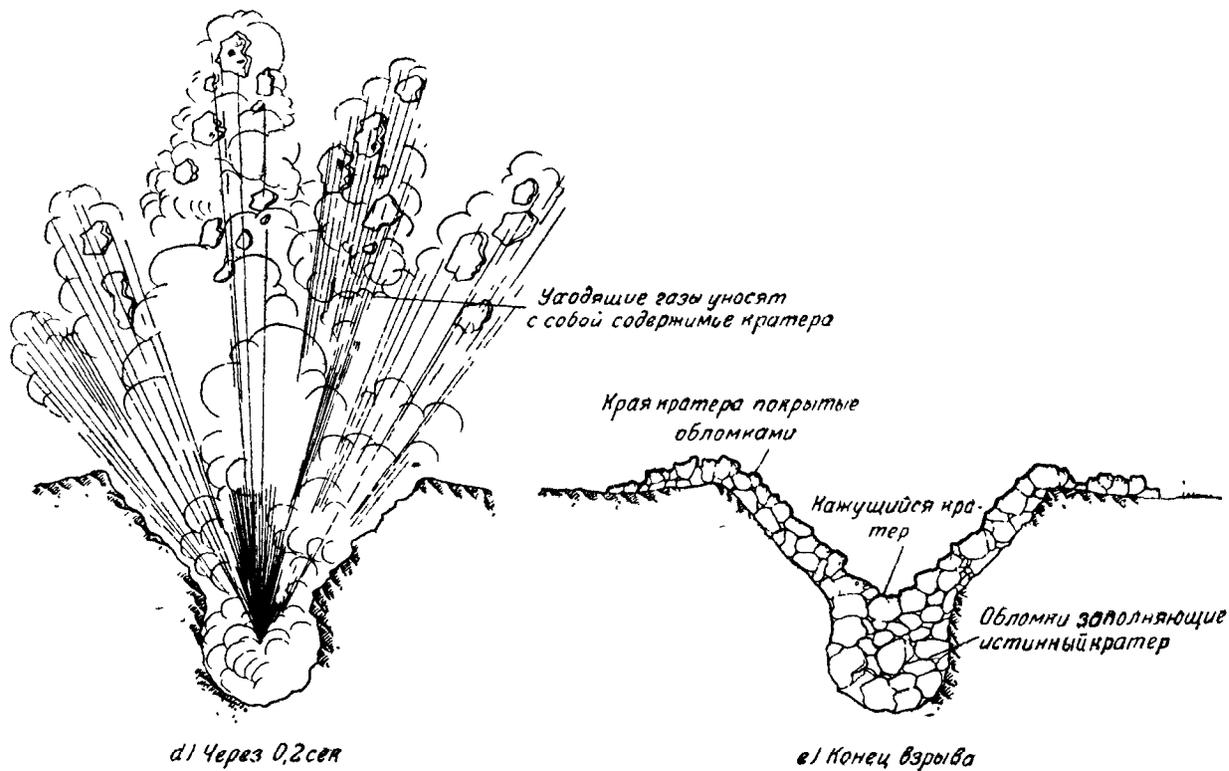


Рис. 4б

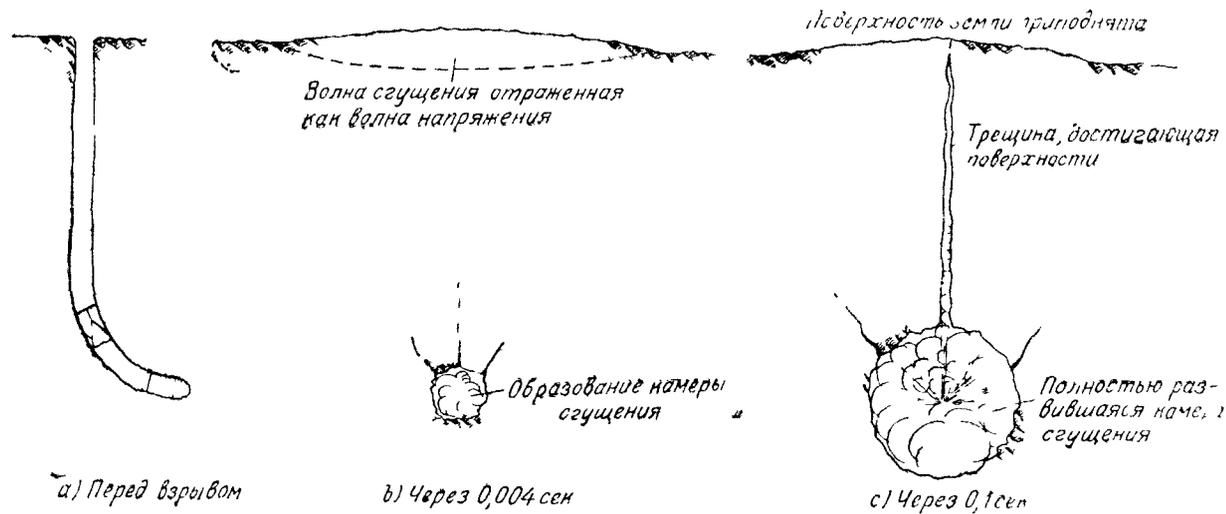


Рис. 4с

сравнительно небольшой вес обломков, образовавшихся непосредственно в месте взрыва

Настоящий очерк, касающийся некоторых физических сторон повреждений от воздушных налётов, показывает, что мы уже имеем количест-

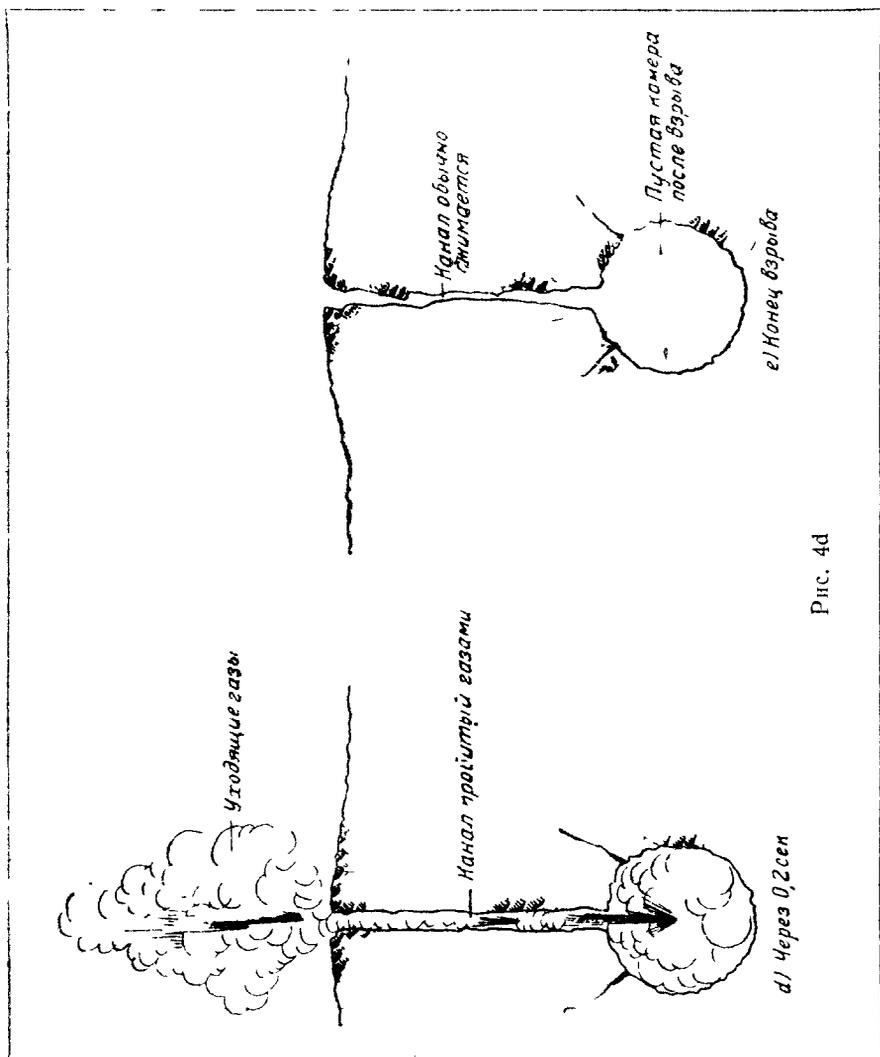


Рис. 4d

венную картину этих явлений, что является первым шагом в борьбе за рациональные способы снижения эффективности воздушных нападений.