

Полученные результаты показывают, что в широком диапазоне давлений и соотношений реагентов S_2 и O_2 может быть обеспечен режим работы генератора атомарного кислорода, позволяющий получать сверхзвуковые потоки, содержащие большое количество атомов кислорода ($\sim 15\%$) с полным давлением порядка нескольких атмосфер. Наличие такого источника открывает возможность создания химического СО-лазера, не требующего системы откачки.

Поступила в редакцию 28/VII 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Hancock, C. Morley, I. W. M. Smith. Chem. Phys. Lett., 1971, 12, 1, 193.
2. R. E. Center. J. Chem. Phys., 1973, 58, 12, 5230.
3. Т. В. Быстрова, М. Н. Сафарян. Письма в ЖТФ, 1978, 4, 16, 984.
4. В. А. Дудкин, А. Ю. Кедров. Письма в ЖТФ, 1981, 7, 8, 463.
5. В. А. Дудкин, А. Ю. Кедров, Ю. Л. Чижов. Химическая физика, 1983, 8, 35.
6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник. М., 1962.
7. Б. Д. Мельник. Инженерный справочник. М.: Химия, 1975.

О МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ДЕТОНАЦИИ И ГОРЕНИИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд, С. А. Цыганов
(Москва)

В связи с возрастающими объемами перевозки и использования в промышленности сжиженных газов в последнее время значительно возросло число публикаций (особенно в зарубежной литературе) по вопросам взрывобезопасности топливно-воздушных смесей. Основными факторами, определяющими опасность взрывчатой смеси, являются давление в волне сжатия, которая образуется при сгорании смеси, и импульс этой волны. В многочисленных работах возможные разрушения при аварийных взрывах целиком определяются совокупностью этих двух параметров. Известно, что давление в волне есть функция скорости выделения энергии при сгорании объема газовой смеси. Многие из крупных аварий, связанных с утечкой газов, описанных, например в [1], оканчивались только пожарами без сильных механических разрушений.

Для возникновения интенсивных волн сжатия по описаниям в [1] требовались специальные условия (значительное время от момента прорыва газа до зажигания, наличие большого числа загромождающих пространство предметов или зданий, высокая реакционная способность горючего, отсутствие сильного ветра и т. д.). Как показывают работы по численному моделированию поля давления при сферическом сгорании объемов газовой смеси, ударная волна с амплитудой порядка 1 атм и выше начинает формироваться только при видимой скорости пламени более 250 м/с [2, 3]. Наибольшая амплитуда волны, естественно, достигается при детонации смеси, обеспечивающей максимально возможную скорость выделения энергии при сгорании смеси.

К сожалению, заранее предсказать уровень скорости сгорания смеси в каких-либо даже предварительно заданных условиях чрезвычайно трудно (на современном уровне моделирования нестационарных газодинамических процессов без эмпирических подходов для реальных ситуаций со сложной конфигурацией поверхности земли и застроек это сделать практически невозможно). В случае же, когда и конфигурация образующегося в результате аварии облака заранее неизвестна, приходится использовать только оценки максимально возможных возмущений. Хотя такие оценки всегда дают завышенные степени опасности [4], тем не менее расчет безопасных расстояний чаще всего производится на

основании максимально возможных скоростей сгорания, т. е. детонационных [4]. В принципе, имеющиеся в литературе экспериментальные данные по сгоранию больших объемов газов в открытых пространствах и результаты численного моделирования газодинамических явлений при сгорании смеси с постоянной скоростью уже сейчас позволяют хотя бы приближенно оценить поля давления при недетонационных взрывах. Этот подход, однако, не используется, по-видимому, вследствие того, что в реальных аварийных ситуациях следует учитывать слишком много факторов, которые могут повлиять на образование облака, его форму и положение.

При оценке степени возможной опасности механических разрушений часто говорят об области вне облака, поскольку, в самом облаке воздействие не только механическое, но и температурное. Кроме того, внутри облака разрушения обычно велики, волны достигают амплитуды нескольких атмосфер (или десятков при быстром сгорании и детонации). Вне облака воздействие газового взрыва определяется не только скоростью выделения энергии, но и абсолютной величиной энергии, запасенной в смеси. При этом, если говорить о скоростях горения, при которых возникают хотя бы квазиакустические волны с амплитудой в несколько сотых атмосферы и выше, импульс фазы сжатия в волне для газовых облаков будет определяться в основном полной выделившейся при взрыве энергией. Это четко демонстрируют результаты моделирования взрыва в [3, 5]. Таким образом, импульс волны есть слабая функция скорости тепловыделения, чего нельзя сказать об амплитуде волны давления. Этот параметр сильно зависит от скорости сгорания (скорости взрывного превращения в общем случае).

По итогам экспериментального и теоретического анализа в [1, 7, 8] легко заключить, что механическое разрушение под влиянием взрывной волны — функция ее импульса и перепада давления. Для каждого вида инженерных сооружений можно определить критические кривые в форме гиперболической зависимости вида [1, 8]

$$(p - p_*)(I - I_*) = c. \quad (1)$$

Эти кривые разделяют плоскость перепад давления в волне — импульс на зону поражения (выше кривой) и зону неразрушения (ниже кривой). Величины p_* , I_* отвечают критическим перепаду давления и импульсу, вызывающим разрушение объекта в бесконечно длинной (p_*) и в короткой волне (I_*).

Для оценок вероятности разрушения при аварийном взрыве необходимо иметь полное представление о зависимости давления и импульса волны от расстояния до облака для всех возможных режимов распространения пламени. Определение таких зависимостей — достаточно трудоемкая задача, и часто предпочитают пользоваться полями параметров, установленными для наиболее опасного режима — детонации. Конкретный вид зависимости (1) находят, как правило, в опытах с зарядами ВВ. В связи с наличием в литературе большого количества информации о разрушительном действии взрывов конденсированных ВВ [7] действие и других источников ударных волн для практических приложений также принято выражать эквивалентным количеством ВВ [1].

Однако ясно, что простой перенос закономерностей, установленных для взрыва ВВ на случай так называемых неидеальных взрывов, к которым принадлежат и взрывы газовых смесей, невозможен без экспериментального обоснования. Во-первых, степени расширения продуктов при взрыве газовых смесей на много порядков ниже, чем для ВВ, во-вторых, геометрический размер облака всегда соизмерим с расстояниями, на которых амплитуда давления в волне может рассматриваться как конечная. При рассмотрении двух типов взрывов необходимо выбрать критерии сравнения. Естественными критериями для такого сравнения должны быть давление и импульс волны. Необходимость тщательного анализа состояния экспериментальных исследований параметров взрыв-

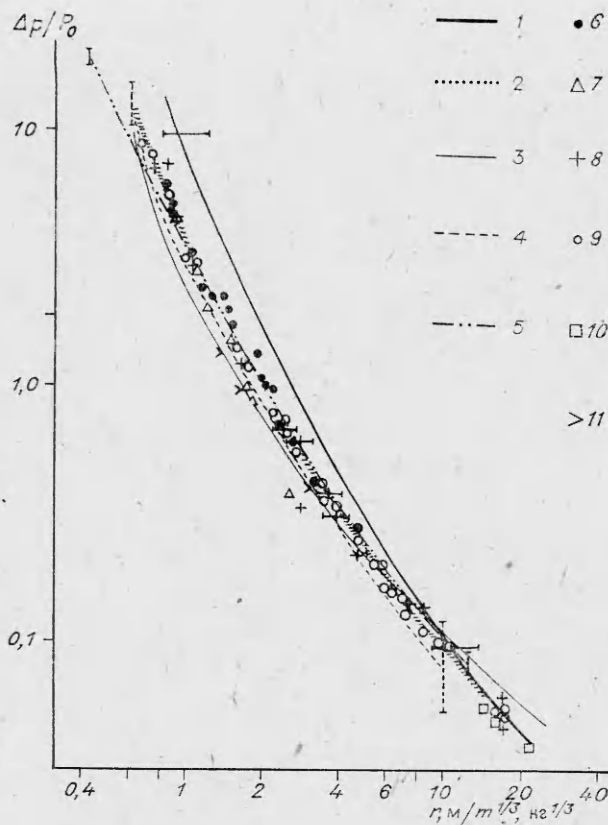


Рис. 1. Зависимость перепада давления в волне от приведенного расстояния для воздушного взрыва (для 8, 9 при $\Delta p \cdot p_0^{-1} < 0,3$ рассмотрение как для «наземного» взрыва).

1 — взрыв зарядов тротила [15]; 2 — по уравнению (2); 3 — расчет [3]; опыты: 4 — [11] для смесей C_2H_2 , C_2H_4 и C_2H_6 с воздухом, объем до 30 м^3 , 5 — [5], смеси C_2H_2 и C_2H_4 с O_2 в объеме $0,5 \text{ л}$, 6 — [2], смеси $CH_4 + 1,5O_2$ и $CH_4 + 2O_2$, 7 — [2], смеси $C_2H_6 + 3,5O_2$, 8 — [10], смеси C_2H_4 + воздух в объеме $3-215 \text{ м}^3$ для $2 > \Delta p \cdot p_0^{-1} > 0,3$, 9 — [10], смеси C_2H_2 + воздух в объеме $1,4-54 \text{ м}^3$, 10 — [12], 11 — в [13] для $2H_2 + O_2$ в объеме $0,395-2,1 \text{ м}^3$.

ных волн состоит также и в том, что имеющиеся сведения используются для обоснования или опровержения теоретических моделей, направленных на расчет полей взрывных параметров при детонации или быстром сгорании объемов газовых смесей

в плоском, цилиндрическом и сферических случаях. В действительности из-за различных неточностей использование некоторых экспериментальных данных для подтверждения разрабатываемых моделей может служить источником дополнительных ошибок вследствие недостаточно корректного сопоставления теоретических и опытных данных.

Попытаемся провести сравнительный анализ имеющихся в литературе данных по взрывам ВВ и газовых смесей на основе так называемых кривых энергетического подобия. Представление поля давления и импульса для ВВ в зависимости от приведенного радиуса, отнесенного к корню кубическому из энергии или к радиусу заряда, обосновано как теоретически (модельными расчетами и с применением теории подобия), так и экспериментально [6, 8, 9]. Было бы целесообразно провести обобщение имеющихся экспериментальных данных для газовых взрывов в аналогичных координатах, хотя заранее трудно сказать, увенчается ли такая попытка успехом. Дело в том, что для газовых взрывов есть еще параметры (кроме безразмерного расстояния), которые необходимо учитывать при моделировании, поскольку такие взрывы нельзя рассматривать как сильные.

Для удобства сравнения на рис. 1 использован безразмерный радиус, отнесенный к корню кубическому из массы тротила, энергия которого равна теплоте сгорания газовой смеси, содержащейся во взорванном объеме (в качестве теплоты сгорания взяты величины при нормальных условиях, обычно приводимые в справочной литературе). На графике нанесены данные по давлению в волне, полученные в самых разнообразных условиях. К сожалению, в подавляющем большинстве работ опыты проведены в условиях, не обеспечивающих строго сферической геометрии распространения волны [10, 11]. Там, где не было уверенности в соответствии измеренного давления так называемому воздушному взрыву (т. е. заряд и датчики подвешены высоко в воздухе и эффект поверхности отсутствует) или наземному взрыву (взрыв на поверхности с полусфери-

ческой геометрии), указывается диапазон по радиусу, к которому следует отнести данное давление. При этом взрыв на поверхности считался эквивалентным воздушному с удвоенной энергией [3]. Все безразмерные радиусы на рис. 1 приведены к воздушному взрыву. Не приведены на графике часть точек из работы [12], соответствующих высоким давлениям $\Delta p \geq 0,2$ МПа, поскольку они оказались систематически ниже основных результатов, и большинство точек для смесей водород — кислород, водород — воздух, поскольку они оказались также лежащими очень низко.

Небольшое отклонение в величине давления ведет к существенному изменению эффективной энергии взрыва, определенной по кривой на рис. 1. Поскольку измеренные значения давления зависят от способа тарирования датчиков давления, не будем рассматривать данные, систематически отклоняющиеся от основной массы результатов.

Для водорода с кислородом показано только несколько точек, их положение свидетельствует о низкой работоспособности смесей, при горении которых убывают числа молекул. В работе [10] использованы богатые смеси, при этом обнаружена зависимость давления в волне от размера облака. Указанная зависимость, по всей видимости, есть следствие догорания части горючего (более эффективное догорание в больших объемах) и разной степени «приподнятости» взрыва при разных объемах. Шары и датчики подвешивали все время на одинаковой высоте, при этом расстояние от периферии шара до грунта изменяли. В связи с этим строгой идентификации условий, при которых взрыв соответствовал данной энергии (т. е. воздушному или наземному), провести для этих измерений нельзя.

С целью упрощения графика данные этой работы представлены в основном как среднее из многих значений. Усреднены величины параметров волн для точек с близкими значениями приведенного радиуса. Для смесей ацетилена с воздухом учтена энергия разложения избыточного ацетилена с образованием сажи. В опытах по взрыву смесей с избытком горючего [10] догорание избыточного горючего, по-видимому, действительно имело место. В связи с тем, что в опытах [10] со смесями ацетилена избыток горючего был выше, чем в смесях со смесями этилена, обнаруженная зависимость интенсивности волны от размера облака в первом случае оказалась выражена ярче. В пределах разброса однотипных измерений все смеси (кислородные и воздушные) для объемов от нескольких литров до десятков кубических метров при взрыве дают близкие результаты по величине перепада давления. Соответствующая зависимость может быть описана уравнением

$$\Delta p \cdot p_0^{-1} = 0,8m^{0,33}r^{-1} + 2,2m^{0,66}r^{-2} + 1,2mr^{-3}. \quad (2)$$

Здесь Δp — перепад давления на фронте; p_0 — начальное давление (для (2) $p = 0,1$ МПа); r — расстояние от центра облака до точки измерения, м; m — масса тротила, энергия которого равна энергии газовой смеси, кг. Ошибка в величине Δp по (2) составляет +20%. Зависимость (2) изображена на рис. 1, 2.

На рис. 1, 3 представлены результаты численного моделирования поля давления детонационного взрыва по [4]. Результаты численного моделирования по [13] для углеводородных смесей практически совпадают с уравнением (2). Отличие данных из [4] от опытных в некоторых областях выходит за пределы ошибки измерения. Уточнение расчетов с учетом сдвига химического равновесия продуктов взрыва в [14] дает значения Δp на 15 ÷ 20% больше, чем в [3, 13]. Однако при точности измерений перепада давления не лучше 10 ÷ 20% и большом разбросе экспериментальных данных утверждать, что учет довыделения энергии за счет сдвига химического равновесия существен, по-видимому, нельзя. На рис. 1, 1 для полноты представлена еще одна зависимость, отвечающая взрыву зарядов тротила по [15]. Горизонтальные отрезки прямых на концах этой кривой означают разброс данных измерения [16]. Влияние расстояния при $10^{-3} \leq \Delta p \leq 1,4$ МПа (характерных для газовых взрывов)

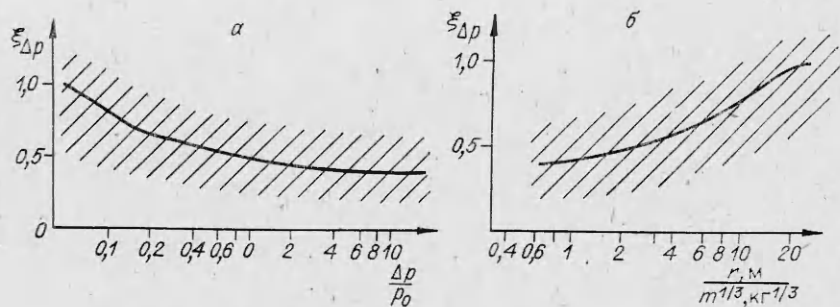


Рис. 2. Зависимость тротилового эквивалента газового взрыва по давлению от перепада давления (а) и приведенного расстояния (б). Заштрихована область неопределенности вычисления тротилового эквивалента вследствие разброса опытных данных.

на интенсивность волны давления при взрыве ВВ описывается уравнением [15].

$$\Delta p = 0,8m^{0,33}r^{-1} + 3m^{0,66}r^{-2} + 5mr^{-3}. \quad (3)$$

Основной особенностью представленных зависимостей изменения давления в волне с расстоянием для газового взрыва и взрыва ВВ является несимбатность линий $\Delta p = \Delta p(r)$. Это означает, что эквивалент газового взрыва по давлению возрастает с удалением от центра. Проводить сравнение параметров взрыва газовой смеси с параметрами воздушной волны от конденсированного ВВ целесообразно только для очень приближенных оценок скорее качественного, чем количественного характера. Имеется еще одна причина, по которой количественная оценка действия газового взрыва путем его сопоставления со взрывом ВВ нецелесообразна. Из рис. 1 видно, что зависимости $\Delta p = \Delta p(m, r)$ не только для газовых смесей, но и для ВВ установлены с большой экспериментальной ошибкой. Эквивалент газового взрыва приходится определять как отношение масс ВВ в (1) и (2), приводящих к одинаковым значениям Δp на одном и том же расстоянии для двух типов взрывов. Безразмерное расстояние вычисляется как $rm^{-0,33}$, поэтому допустимая ошибка в измерении Δp при пересчете на энергетические характеристики ведет к большому разбросу. На рис. 2 показана зависимость условного эквивалента газового взрыва по давлению $\xi_{\Delta p}$ от интенсивности волны и расстояния, рассчитанная по соотношению

$$rm^{-0,33} = 3,3\xi_{\Delta p}^{-0,33} (\xi_{\Delta p} - 0,24) \left\{ 0,73 - \xi_{\Delta p}^{0,33} + \sqrt{(0,73 - \xi_{\Delta p})^2 + 1,78(1 - \xi_{\Delta p}^{0,33})(\xi_{\Delta p} - 0,24)} \right\}^{-1}, \quad (4)$$

которое следует из (1) и (2).

Таким образом, нельзя согласиться с мнением о том, что эквивалент газового детонационного взрыва по давлению для кислородных и воздушных смесей имеет какое-то определенное единственное значение во всем диапазоне интенсивностей ударных волн [12]. С определенностью можно говорить о сближении кривых энергетического подобия по давлению в волне для взрывов ВВ и газов с уменьшением амплитуды волны и ростом расстояния. Нельзя также согласиться с до сих пор бытующим мнением о том, что амплитуда волны при детонационном газовом взрыве на любом расстоянии от центра взрыва всегда ниже, чем при взрыве ВВ [12]. При этом упоминается в качестве аргумента бесспорный факт меньшего значения степени расширения продуктов взрыва газовой смеси. Действительно, из-за существования меньшей степени расширения в продуктах взрыва газовой смеси остается большая доля тепловой энергии, чем в продуктах взрыва ВВ. Однако при такой аргументации не принимают во внимание то обстоятельство, что этот недостаток энергии в какой-то степени компенсируется меньшими потерями вблизи заряда на неизоэнтропический нагрев атмосферы в ударной волне. Таким образом,

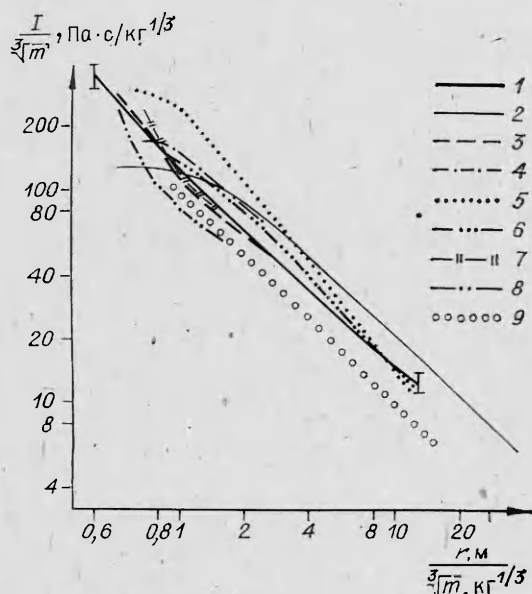


Рис. 3. Зависимость статического импульса $\int \Delta p dt$ фазы сжатия от приведенного расстояния.

Опыты: 1 — [5], 2 — усредненные данные для ВВ по [7, 15, 16], 4 — для ВВ [7, 15, 16], 9 — для смесей углеводород — воздух [11]; 5, 6 — дефлаграция при 190 и 100 м/с [5]; расчет: 3, 7 — для смесей углеводород — воздух [3] и [13] соответственно, 8 — для смесей водород — кислород [13].

фаза сжатия в тепловую энергию E_i ударно-сжатого в волне и вышедшего из нее воздуха. Эта часть энергии не производит механической работы. В действительности коэффициент превращения энергии взрыва в энергию волны η оказывается меньше, чем при адиабатическом расширении продуктов взрыва $\eta_{ад}$

$$\eta < \eta_{ад} = 1 - (p_0^* p_1^{-1})^{(\gamma-1)/\gamma}.$$

Здесь p_1 — давление продуктов взрыва; γ — соотношение удельных теплоемкостей продуктов взрыва при их расширении. В [17] отмечено возрастание E_i по мере удаления от центра взрыва. При этом основная потеря на ударный разогрев происходит для ВВ в зоне $7 < rR_0^{-1} < 25$ при $8 < \Delta p \cdot p_0^{-1} < 100$. Здесь R_0 — радиус заряда. Оказывается, что к тому моменту, когда амплитуда волны от взрыва ВВ снизится до уровня, отвечающего параметрам Чепмена — Жуге для топливно-воздушных смесей, энергия в волне составит не более 50—60% энергии взрыва. Именно этим и объясняется сближение параметров волн по давлению для взрывов газовых смесей и конденсированных ВВ.

Представленные на рис. 4 данные и соотношение (2) позволяют определить поле давления при газовом взрыве и оценить действие взрыва без необходимости проводить аналогию со взрывом ВВ. Но эти оценки дадут максимальный разрушительный эффект, так как рассматривались только опыты с детонацией газов. Кроме того, пока анализировался только один фактор разрушения — перепад давления в волне.

К сожалению, данных по измерению импульса на фазе сжатия известно значительно меньше, чем по измерениям давления, а также более низка их точность. На рис. 3 даны результаты нескольких работ, где все данные приведены к «воздушному» взрыву. Численное моделирование [3, 13] дает результаты, удовлетворительно согласующиеся с опытными данными для малых объемов углеводородно-кислородных смесей [5]. Расчеты в [14] с учетом сдвига равновесия дают величины I ,

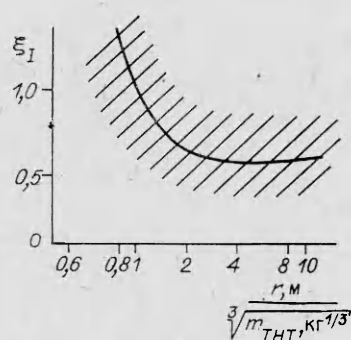


Рис. 4. Зависимость тротилового эквивалента газового взрыва по импульсу от расстояния. Заштрихована область неопределенности из-за разброса опытных данных.

если при газовом взрыве большая доля тепловой энергии остается в продуктах взрыва, то при взрыве ВВ — значительная ее часть остается в воздухе в ближней к заряду ВВ зоне взрыва. Еще в [17] указывалось, что при движении сильной ударной волны (как при взрыве ВВ) часть ее энергии бесполезно теряется в результате диссипативных процессов на

близкие к рис. 3, 9. Импульс волн, измеренных при детонации больших объемов углеводородно-воздушных смесей, оказывается несколько меньшим. Эту разницу на данном этапе объяснить не удастся, если не предполагать систематических ошибок измерений или отклонения в эксперименте от условий, для которых проведено моделирование. По всей видимости, из совпадения расчетных и опытных зависимостей [4, 5, 6] можно заключить о наличии единой зависимости $I^{-0,33} = f(rm^{-0,33})$ для всех детонационных взрывов. На основе имеющихся данных такая зависимость может быть описана уравнением вида

$$Im^{-0,33} = 123m^{0,33}r^{-1}, \quad (5)$$

где I — импульс, Па · с.

На рис. 3 кривая 8 лежит ниже соответствующих кривых для углеводородно-воздушных смесей, как и в случае зависимости $\Delta p = \Delta p(m^{0,33}r^{-1})$. Это говорит о меньшей эффективности взрыва смесей, в которых реакция идет с уменьшением числа молекул.

Для полноты сравнения на рис. 3, 2, 4 приведены данные для взрыва ВВ. В диапазоне изменения приведенного радиуса, представляющего интерес для анализа газовых взрывов и при $\Delta p \cdot p_0^{-1} < 10$, импульс от взрыва ВВ находим из выражения

$$Im^{-0,33} = 250[m^{-0,33}r + 1]^{-1}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) получим для величины тротилового эквивалента по импульсу выражение

$$\xi_r = \sqrt{0,5(1 + m^{0,33}r^{-1})} + 0,006(rm^{-0,33} + 1). \quad (7)$$

Соответствующая зависимость приведена на рис. 4. Тротильный эквивалент газового взрыва по импульсу непостоянен, но эта зависимость иная, чем для тротилового эквивалента по давлению. При $rm^{-0,33} < 1$ для газового взрыва импульс $\xi_r > 1$ и убывает при выходе волны из взорвавшегося объема до практически постоянного значения $\xi_r \approx 0,55$ при $rm^{-0,33} > 2$. Импульс от дефлаграционного взрыва, как правило, не ниже импульса от детонационного взрыва. На рис. 3 приведены величины импульса при дефлаграции кислородных смесей со скоростью 190 (5) и 100 м/с (6) по [5]. Численное моделирование дает иные закономерности: импульс волны сжатия при сверхзвуковых скоростях горения равен таковому при детонации. В дальней зоне взрыва при всех скоростях горения импульсы волн сжатия совпадают и при $\Delta p < 0,1$ МПа по величине импульса вообще нельзя судить о характере взрывного превращения.

Таким образом, рассмотрение имеющихся литературных данных по экспериментальному и численному моделированию сферических детонационных взрывов облаков газовых смесей позволяет сформулировать законы энергетического подобия для них по давлению и импульсу. В пределах допустимой опытной погрешности все имеющиеся данные хорошо описываются единой зависимостью. В то же время пределы ошибок эксперимента остаются достаточно большими. В связи с этим введение так называемого тротилового эквивалента как строгой количественной характеристики газового взрыва нецелесообразно. Можно также считать однозначно установленным, что величина импульса давления в широком диапазоне скоростей взрывчатого превращения, так же как для ВВ, остается постоянной.

Поступила в редакцию 15/XII 1983,
после доработки — 30/VII 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. R. A. Strehlow, W. E. Baker. Progr. Energy Combustion Sci., 1976, 2, 2760.
2. J. H. Lee, C. M. Guirao, K. W. Chiu e. a. Loss Prevention, 1977, 11, 59.
3. R. A. Strehlow, R. T. Lucritz, A. A. Adameczyk e. a. Comb. Flame, 1979, 35, 3, 297.
4. W. Geiger. — In: Discussion on Explosion Hazards. Göttingen, Max — Plank — Institut für Strömungs Forschung, Bericht 23/1979, 1979.

5. D. Desbordes, N. Manson, J. Brossard. Acta Astronaut., 1978, 5.
6. М. А. Садовский. Физика взрыва. № 1. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
7. W. E. Baker. Explosions in Air. Univ. of Texas Press, 1973.
8. M. Held. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1983, 8, 1.
9. Г. Броуд. Расчеты взрывов на ЭВМ. М.: Мир, 1976.
10. J. Brossard, J. Duco, T. Gobert e. a. Proceedings of ENSZANS International Topical Meeting on Nuclear Power Reactor Safety. Brussels, 1978.
11. В. П. Кочегаров. Канд. дис. МИСИ, 1980.
12. С. М. Когарко, В. В. Адушкин, А. Г. Лямин. ФГВ, 1965, 1, 2, 22.
13. B. D. Fishburn. Acta Astronaut., 1976, 3, 1049.
14. С. А. Ждан. ФГВ, 1983, 19, 1, 131.
15. D. J. Lewis. Condensed Phase Explosions and Their Blast Characteristics. Euro-mech — 139, Aberystwith, 1981.
16. V. J. Clancey. The Propagation of Shock Waves. London, 1981.
17. Б. Д. Христофоров. ПМТФ, 1961, 5, 175.

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ РАЗРУШЕНИЯ И ОТКОЛ

А. Г. Иванов

(Москва)

В механике имеется одна область, где многое неясно и по сей день. Это область разрушения. Так, если задан некий объект (образец материала, простейшая конструкция) и приложенные к нему нагрузки, — вопроса об определении напряженно-деформированного его состояния не существует (конечно, для материалов с известными свойствами). Однако если поставить вопрос о разрушении этого объекта, и тем более в условиях динамического, импульсного нагружения, заранее сказать, какие нагрузки он выдержит, где его слабое место, каков будет характер его разрушения (быстрый, катастрофический, с полным разделением объекта на части или вялый, путем медленно растущих трещин, без полного нарушения сплошности), — на эти вопросы ответа можно и не получить или ответ может быть неоднозначным.

Это указывает не только на отсутствие достаточно надежной теории разрушения, но и на недостаточность исходных данных, необходимых для получения конечного ответа, на физическую необоснованность в ряде случаев наших представлений при описании явления разрушения.

Продемонстрируем сказанное выше на конкретном примере. Известно, что напряженное состояние трубы (или сферического сосуда) из заданного материала и находящейся под внутренним давлением (p_0) или нагруженной импульсно, например взрывом заряда ВВ, зависит только от относительного ее размера и значения p_0 или материала ВВ, но не зависит от их абсолютных размеров¹. Логично предположить, что и ответ на вопросы о несущей способности, наиболее слабом месте и о характере разрушения также должен определяться относительными размерами объекта и заряда ВВ, т. е. напряженным состоянием. Эксперимент опровергает эти предсказания.

На рис. 1 изображен котел высокого давления (КВД) с указанием его относительных размеров, выполненный из котельной стали 22К [1, 2]. Испытывались котлы двух размеров: $R = 1000$ и 100 мм. Нагружение проводили однократно взрывами зарядов ВВ, расположенными в центре. При одинаковом отношении веса заряда ВВ к весу котла ξ или, что тоже самое, при одном и том же относительном радиусе r заряда ВВ интенсивность нагружения и напряженные состояния на сходные моменты времени одинаковы независимо от R .

Рассмотрим прочностные характеристики.

¹ Отличие в поведении материала за счет различия в скоростях нагружения $\dot{\sigma}$ и деформации $\dot{\epsilon}$ невелико. Так, согласно [3], при изменении $\dot{\epsilon}$ в 10 раз величина предела текучести σ_y у сталей изменяется не более $\sim 5\%$.