

## ИМПУЛЬСНОЕ СХЛОПЫВАНИЕ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК, ЗАПОЛНЕННЫХ ЖИДКОСТЬЮ ИЛИ ГАЗОМ

УДК 539.3;534.1

В. А. Огородников, А. Г. Иванов, В. В. Мишуков,  
В. А. Григорьев, А. А. Садовой, Ю. В. Янилкин,  
А. Л. Стадник, В. Н. Минеев

ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

*Представлены результаты экспериментального исследования импульсного схлопывания стальных трубопроводов, заполненных водой или воздухом, при ударе по нему с двух противоположных сторон массивными пластинами-ударниками, одновременно разгоняемыми навстречу друг другу зарядом взрывчатого вещества. Результаты опытов подтвердили перспективность рассмотренного способа схлопывания стенок трубопроводов различных типовых размеров, заполненных жидкостью или газом. Приведены результаты численных расчетов по трехмерному моделированию процесса динамического схлопывания труб ударом разогнанных пластин. Рассмотрены особенности проведения подобных расчетов, связанные с использованием эйлеровой методики расчета упруго-пластических течений применительно к описанию процессов, которые происходят в устройствах для аварийного перекрытия стальных трубопроводов, заполненных жидкостью.*

В ряде отраслей, например в нефтяной и газовой промышленности, атомной энергетике, существует проблема, связанная с быстрым перекрытием трубопроводов различных типовых размеров, заполненных газом, жидкостью или газоконденсатом, с целью уменьшения последствий аварийных ситуаций. Представляется привлекательным использовать современные взрывные технологии для аварийного перекрытия участков трубопроводов. Однако создание быстродействующих затворов взрывного типа, основанных на импульсном схлопывании стенок трубопроводов различных типовых размеров, работающих при различных давлениях и температурах и предназначенных для транспортировки различных сред (в том числе горючих и токсичных жидкостей, газоконденсатов или газов), является непростой задачей, решение которой требует новых подходов и большого объема экспериментальной отработки. С целью расширения возможностей оптимизации элементов таких устройств необходимы разработка и внедрение в практику современных численных методик счета указанных задач.

1. При традиционной схеме взрывного нагружения [1] импульсная нагрузка создается подрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ), концентрически расположенного на поверхности участка трубопровода (оболочки) длиной  $l = (1 - 2)R$  ( $R$  — наружный радиус оболочки) либо на смягчающей прокладке. При этом процесс импульсного схлопывания стальных цилиндрических оболочек с полостью, заполненной более плотной, чем воздух, средой, например водой, имеет особенности (см. [2]), связанные с существованием волн

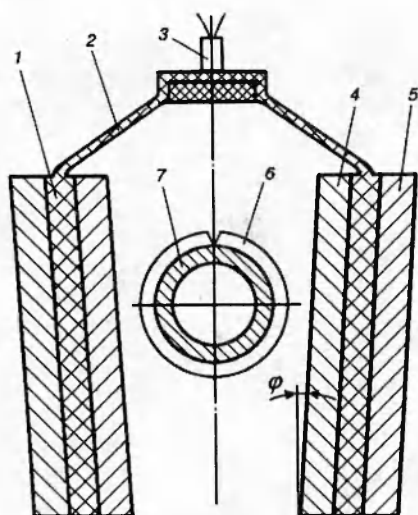


Рис. 1. Схема проведения опытов:

1 — заряд ВВ; 2 — генератор линейной детонационной волны; 3 — электродетонатор; 4 — пластина-ударник; 5 — экран; 6 — концентратор напряжений; 7 — трубопровод

сжатия в этой среде, которые препятствуют схлопыванию стенок с полным перекрытием проходного канала оболочки.

С учетом этих особенностей представляет интерес более плавный способ нагружения необходимого участка трубопровода, заполненного жидкостью, с помощью удара по нему с двух противоположных сторон массивными пластинами-ударниками, одновременно разгоняемыми навстречу друг другу зарядом ВВ [3]. В этом случае схлопывание стенок трубопровода с жидкостью или газом может быть достигнуто, если скорость пластин-ударников  $W$  достаточна для того, чтобы перевести материал стенок трубопровода в пластическое состояние, но не настолько велика, чтобы возбудить, например, в жидкости волны сжатия большой интенсивности. Скорость  $W$  находится из условия полного перехода начальной кинетической энергии пластин-ударников в работу пластической деформации при схлопывании стенок трубопровода. Очевидно, что с увеличением диаметра и толщины стенок трубопровода эти условия будут реализованы в основном за счет увеличения массы пластин-ударников (их размеров) при  $W = \text{const}$ .

К сожалению, рассматриваемый способ схлопывания стенок трубопровода в силу начальной цилиндрической геометрии имеет недостаток, связанный с эффектом недожатия в центре и у краев схлопывающихся стенок трубопровода. Для его устранения предложено техническое решение [4], связанное с расположением на наружной поверхности нагружаемого участка трубопровода концентратора напряжений в виде, например, металлического кольца, выполненного из материала, имеющего твердость не меньшую, чем материал стенок трубопровода. Использование концентратора позволяет устранить эффект недожатия за счет пластического течения материала трубопровода в области расположения концентратора, связанного с его вдавливанием в материал стенок трубопровода. Форма и размеры концентратора напряжений определяются экспериментально.

На рис. 1 приведена схема проведения опытов по реализации рассмотренного выше способа. Детонация основного заряда ВВ 1 возбуждается генератором линейной детонационной волны 2 с электродетонатором 3. Пластины-ударники 4 располагаются под углом  $\varphi$  к стенке трубопровода 7 с концентратором 6. На их поверхности располагается заряд ВВ, который прикрывается экраном 5. Экраны выполняются из того же материала, что и пластины-ударники, имеют примерно равную им толщину и служат для увеличения коэф-

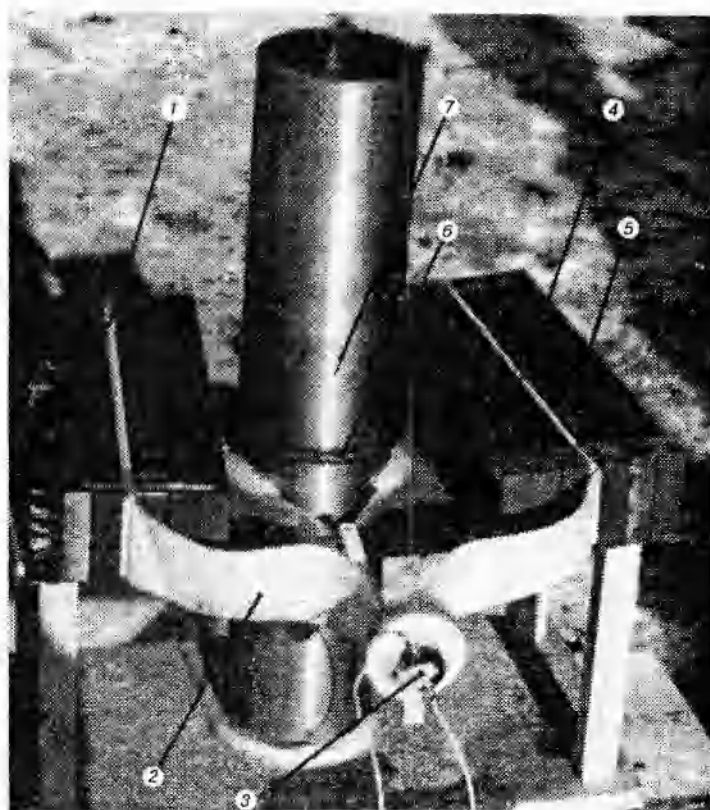


Рис. 2. Фотография экспериментальной сборки (обозначения те же, что и на рис. 1)

фициента отбора энергии от заряда ВВ пластиной-ударником и для упрощения расчетной схемы метания. При этом согласно [5]

$$W = D \left( \frac{1}{8} \frac{\rho_{ВВ} \Delta_{ВВ} \Delta_{э}}{\rho_{уд} \Delta_{уд} (\Delta_{э} + \Delta_{уд})} \right)^{1/2}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{W}{D},$$

где  $D$  — скорость детонации;  $\rho_{ВВ}$ ,  $\rho_{уд}$  — плотность заряда ВВ и материала ударника (в данном случае  $D = 7,8$  км/с,  $\rho_{ВВ} = 1,51$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_{уд} = 7,85$  г/см<sup>3</sup>);  $\Delta_{уд}$ ,  $\Delta_{э}$ ,  $\Delta_{ВВ}$  — толщины ударника, экрана и ВВ.

По схеме, изображенной на рис. 1, проведены две серии опытов с трубами, заполненными воздухом или водой при нормальных условиях ( $T = 300$  К,  $p = 0,1$  МПа). В опытах использовались трубы, выполненные из разных марок стали (Ст.20, 40Х, Х18Н10Т) и имеющие типовые размеры, рассчитанные для различных условий эксплуатации. В частности, при давлениях до нескольких мегапаскалей использовались трубопроводы с относительной толщиной стенки  $\delta = \Delta_{тр}/R = 5 \dots 7\%$ , при  $p > 10$  МПа — более мощные трубопроводы с  $\delta = 15 \dots 25\%$ . Для обоих случаев проведены опыты с изменением масштаба в  $\sim 5$  раз. Условия опытов, в которых достигнуто полное схлопывание стенок трубопроводов, отражены в таблице. Факт полного схлопывания стенок трубопровода определялся по отсутствию течи воды, налитой с одного из его торцов.

На рис. 2 приведена фотография экспериментальной сборки с трубой  $\varnothing 113 \times 10$  мм, а на рис. 3 — фотография труб различных типовых размеров (после схлопывания).

Полученные результаты подтвердили перспективность выбранного способа схлопывания стенок трубопроводов различных типовых размеров, заполненных как жидкостью, так

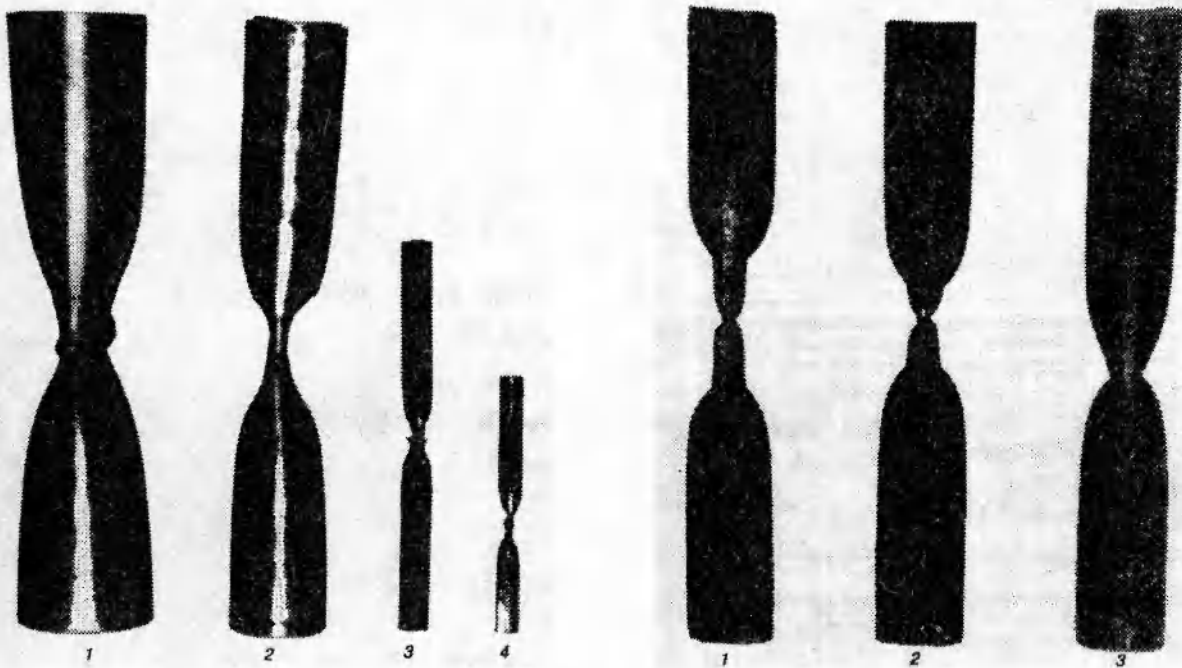


Рис. 3

Рис. 4

Рис. 3. Фотография труб различных типовых размеров:

1 —  $\varnothing 113 \times 10$ ; 2 —  $\varnothing 80 \times 6$ ; 3 —  $\varnothing 27 \times 2,5$ ; 4 —  $\varnothing 22 \times 2$

Рис. 4. Фотография труб, нагруженных пластинами-ударниками различной ширины:  $l/R = 3$  (1), 2 (2) и 1 (3)

и газом. Установлено, что для решения поставленной задачи необходимо использовать для пластин-ударников диапазон скоростей  $W = 100 \dots 300$  м/с. При этом их толщина растет по мере увеличения размеров трубопровода. Отношение  $\Delta_{уд}/\Delta_{тр}$  сохраняется примерно постоянным, и для участков трубопроводов, заполненных водой, составляет величину, равную  $12 \dots 13$  и  $6 \dots 7$  при  $\delta = 5 \dots 7$  и  $15 \dots 25\%$  соответственно. Размеры концентратора (диаметр тока  $d_k$ ) также увеличиваются с сохранением условия  $d_k/\Delta_{тр} \approx 1 \dots 2$  как для относительно тонких, так и для относительно толстых трубопроводов. Схлопывание стенок аналогичных трубопроводов, заполненных воздухом, реализовывалось при меньших толщинах пластин-ударников ( $\Delta_{уд}/\Delta_{тр} \approx 7 \dots 8$  и  $4 \dots 6$  при  $\delta = 5 \dots 7$  и  $15 \dots 25\%$  соответственно), но при прочих близких условиях нагружения.

Наряду с опытами, постановка которых приведена в таблице, в процессе отработки способа проведены опыты, в которых реализовывались условия как недожатия стенок трубопровода до их полного схлопывания, так и пережатия (перерезание трубопровода в месте расположения концентратора). В последних опытах заметно влияние марки стали, из которой сделаны стенки стенок трубопроводов, на процесс схлопывания. Так, в трубопроводах, выполненных из стали 40Х, как правило, наблюдались трещины вдоль линии сгиба стенок. Образование трещин в меньшей степени имело место в опытах с трубами из Ст.20 и полностью отсутствовало в опытах с трубами из более пластичной стали Х18Н10Т.

В целях оптимизации условий нагружения и минимизации расхода ВВ проведены спе-

| Среда  | Номер опыта | Труба     |          |      | l, см | h, см | $\Delta_{\text{э}}, \text{см}$ | $\Delta_{\text{ВВ}}, \text{см}$ | $\Delta_{\text{уд}}, \text{см}$ | W, м/с | d <sub>к</sub> , мм | V, см <sup>3</sup> | E <sub>к</sub> · 10 <sup>-3</sup> , Дж |
|--------|-------------|-----------|----------|------|-------|-------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|---------------------|--------------------|--|
|        |             | Ø × Δ, мм | материал | δ, % |       |       |                                |                                 |                                 |        |                     |                    |  |
| Воздух | 1           | 22 × 0,6  | 40X      | 5,5  | 12    | 2,5   | 0,1                            | 0,03                            | 0,5                             | 121    | 3                   | 2,4                | 1,7                                    |
|        | 2           | 113 × 3   | Ст.20    | 5,3  | 30    | 6,5   | 2,0                            | 0,24                            | 2,0                             | 297    | 5                   | 192                | 270                                    |
|        | 3           | 150 × 5   | X18H10T  | 6,7  | 45    | 15    | 4,0                            | 0,26                            | 4,0                             | 226    | 8                   | 708                | 1073                                   |
|        | 4           | 22 × 1,5  | X18H10T  | 13,6 | 12    | 2,5   | 1,0                            | 0,046                           | 1,0                             | 183    | 3                   | 4,9                | 7,9                                    |
|        | 5           | 22 × 2    | 40X      | 18,2 | 12    | 2,5   | 1,0                            | 0,06                            | 1,0                             | 210    | 3                   | 6,4                | 10,4                                   |
|        | 6           | 20 × 2,5  | X18H10T  | 25   | 12    | 2,5   | 1,0                            | 0,06                            | 1,0                             | 210    | 4                   | 7,2                | 10,4                                   |
|        | 7           | 27 × 2,5  | Ст.20    | 18,5 | 12    | 2,5   | 1,0                            | 0,08                            | 1,0                             | 242    | 4                   | 12                 | 13,8                                   |
|        | 8           | 80 × 6    | Ст.20    | 15   | 30    | 6,5   | 3,0                            | 0,4                             | 3,0                             | 311    | 8                   | 216                | 444                                    |
|        | 9           | 113 × 10  | Ст.20    | 17,7 | 30    | 10    | 4,0                            | 0,5                             | 4,0                             | 304    | 10                  | 719                | 870                                    |
| Вода   | 10          | 22 × 0,6  | 40X      | 5,5  | 12    | 2,5   | 0,25                           | 0,03                            | 0,75                            | 121    | 3                   | 2,4                | 2,6                                    |
|        | 11          | 113 × 3   | Ст.20    | 5,3  | 30    | 6,5   | 4,0                            | 0,23                            | 4,0                             | 205    | 8                   | 192                | 257                                    |
|        | 12          | 150 × 5   | X18H10T  | 6,7  | 45    | 15    | 8,0                            | 0,37                            | 6,0                             | 225    | 8                   | 708                | 1600                                   |
|        | 13          | 22 × 1,5  | X18H10T  | 13,6 | 12    | 2,5   | 1,5                            | 0,59                            | 1,5                             | 170    | 3                   | 4,9                | 10,2                                   |
|        | 14          | 22 × 2    | 40X      | 18,2 | 12    | 2,5   | 1,5                            | 0,09                            | 1,5                             | 210    | 3                   | 6,4                | 15,6                                   |
|        | 15          | 20 × 2,5  | X18H10T  | 25   | 12    | 2,5   | 1,5                            | 0,09                            | 1,5                             | 210    | 3                   | 7,2                | 15,6                                   |
|        | 16          | 27 × 2,5  | Ст.20    | 18,5 | 12    | 2,5   | 1,5                            | 0,1                             | 1,5                             | 221    | 4                   | 12                 | 17,3                                   |
|        | 17          | 80 × 6    | Ст.20    | 15   | 30    | 6,5   | 4,0                            | 0,5                             | 4,0                             | 304    | 8                   | 216                | 566                                    |
|        | 18          | 113 × 10  | Ст.20    | 17,7 | 30    | 10    | 6,0                            | 0,8                             | 6,0                             | 313    | 10                  | 719                | 1380                                   |

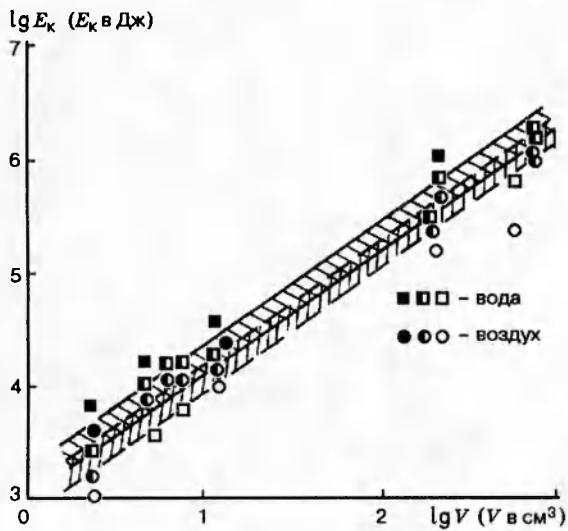


Рис. 5

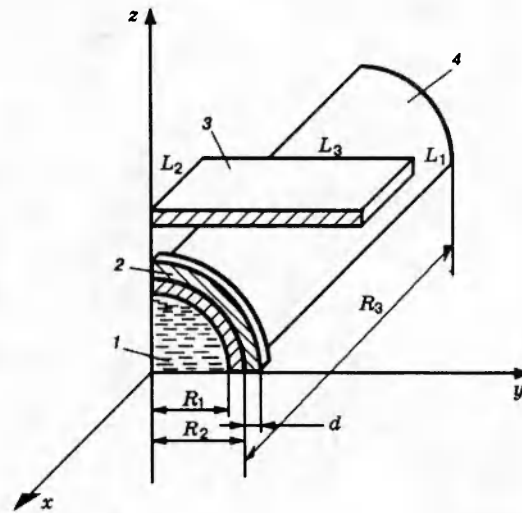


Рис. 6

Рис. 5. Связь кинетической энергии пластин-ударников с деформируемым объемом

Рис. 6. Начальная геометрия системы:

1 — жидкость (вода); 2 — концентратор из Ст.20 ( $d_k = 4$  мм); 3 — ударник ( $L_1 = 15$ ,  $L_2 = 12,5$ ,  $L_3 = 30$  мм); 4 — труба из Ст.20 ( $R_1 = 11$ ,  $R_2 = 13,5$  мм)

циальные опыты с трубами из Ст.20  $\varnothing 27 \times 2,5$  мм по выбору оптимальных длины и ширины пластин-ударников. На рис. 4 приведены фотографии труб, нагружаемых пластинами-ударниками шириной  $\sim R$ ,  $2R$  и  $3R$  при расчетных значениях скорости 326, 221 и 183 м/с соответственно, т. е. при сохранении условия постоянства кинетической энергии пластин-ударников ( $E_k \approx \text{const}$ ). Установлено, что оптимальным является нагружение участка трубопровода с помощью пластин-ударников шириной  $h \approx 2R$  и длиной  $l \approx 6R$ .

Начальная кинетическая энергии системы пластин-ударников ( $E_k = \rho_{уд} \Delta_{уд} l h W^2$ ) в процессе нагружения переходит в работу пластической деформации изгиба, и она определяет объем деформируемого материала стенок трубопровода и кольца:

$$V = V_{тр} + V_k = 2\pi R_{тр}^{cp} \Delta_{тр} (h + 2R) + 2\pi R_k^{cp} \pi \frac{d_k^2}{4}.$$

Зависимость  $E_k(V)$ , полученная по результатам всей совокупности опытов, в которых реализовались условия полного схлопывания стенок трубопроводов, а также их недожатия (светлые точки) или пережатия (темные точки), приведена на рис. 5. Видно, что при использовании импульсного схлопывания стенок относительно тонких и относительно толстых труб, заполненных водой или воздухом, особенностей не наблюдается. При этом в плоскости  $\lg E_k - \lg V$  для труб, заполненных водой или воздухом, можно выделить некоторые области дозволённых значений кинетической энергии пластин-ударников, внутри которых возможно схлопывание стенок трубопроводов с полным перекрытием проходного сечения. Размеры и расположение таких областей будут определяться упруговязкопластическими свойствами материалов стенки трубопровода и концентратора напряжений и технологией их изготовления, а также транспортируемой по трубопроводу средой (газ, газоконденсат, жидкости), температурой и давлением в ней. Поэтому в каждом конкретном

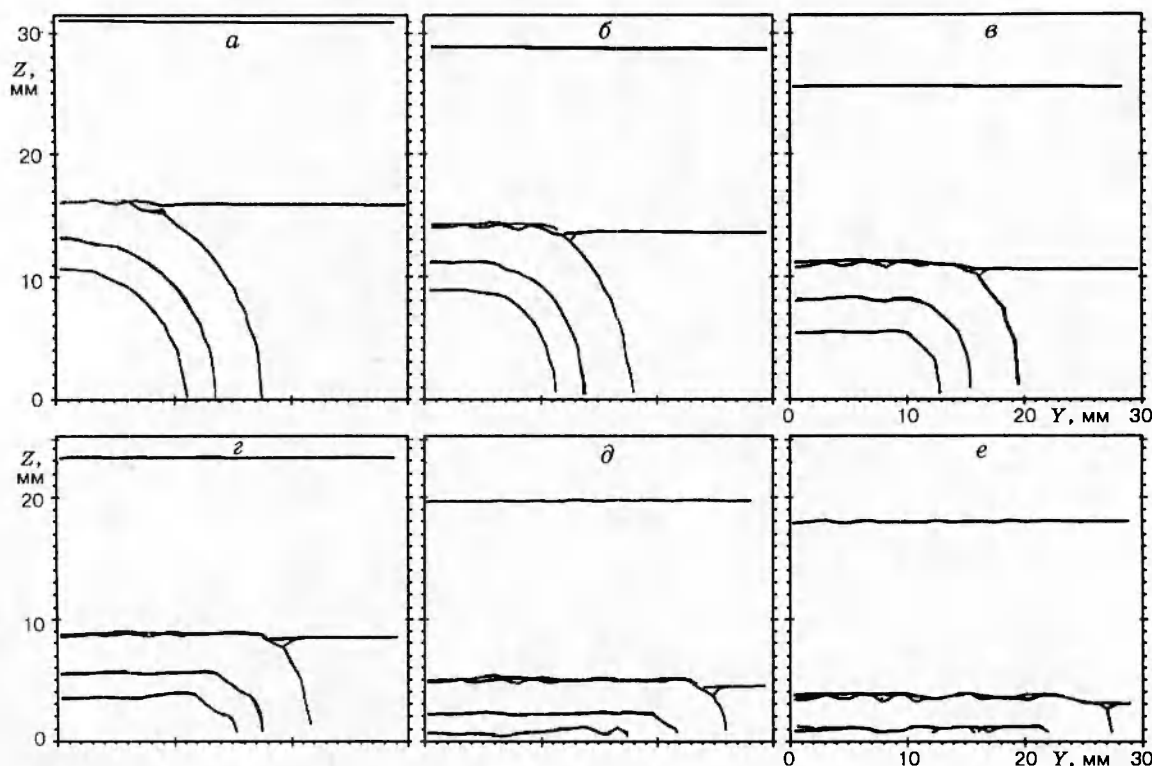


Рис. 7. Геометрия системы в сечении  $X = 0$  в различные моменты времени:

$t$ , мкс:  $a$  — 100,  $b$  — 200,  $c$  — 350,  $d$  — 500,  $e$  — 1050

случае они должны строго определяться экспериментальным или расчетным путем.

2. Возможности расчетного моделирования рассматриваемых процессов импульсного схлопывания стенок трубопровода с жидкостью иллюстрируются опытом № 16 из таблицы.

Рассматриваемые ниже задачи моделировались по упругопластической методике комплекса программ ТРЭК [6]. Комплекс ТРЭК предназначен для численного моделирования нестационарных трехмерных сжимаемых течений многокомпонентной среды. Для моделируемых течений характерно наличие больших деформаций, вплоть до их перехода в турбулизованный режим. Комплекс ТРЭК создан как обобщение комплекса двумерных программ ЭГАК [7], который нашел широкое применение в практике. В настоящей работе для расчета газодинамических и упругопластических течений применялась эйлерова методика. Компонентами могут быть разные вещества со своими уравнениями состояния, вакуум и абсолютно несжимаемые тела. Применялось континуальное представление всех компонентов. Для индивидуализации компонентов использовались их плотности и объемные концентрации, а также удельные энергии. Расчетная сетка представляет собой совокупность шестигранников, в общем случае произвольных. В настоящее время в комплексе используются эйлеровы методы.

Для предотвращения размывания контактных границ между компонентами в процессе счета в комплексе применяется метод концентраций, предложенный в работе [8] для газодинамических двумерных течений. Суть этого метода заключается в следующем. При счете потоков из смешанных (содержащих несколько компонентов) ячеек анализируется поле концентрации, на основе этого анализа определяются объем и порядок вытекания

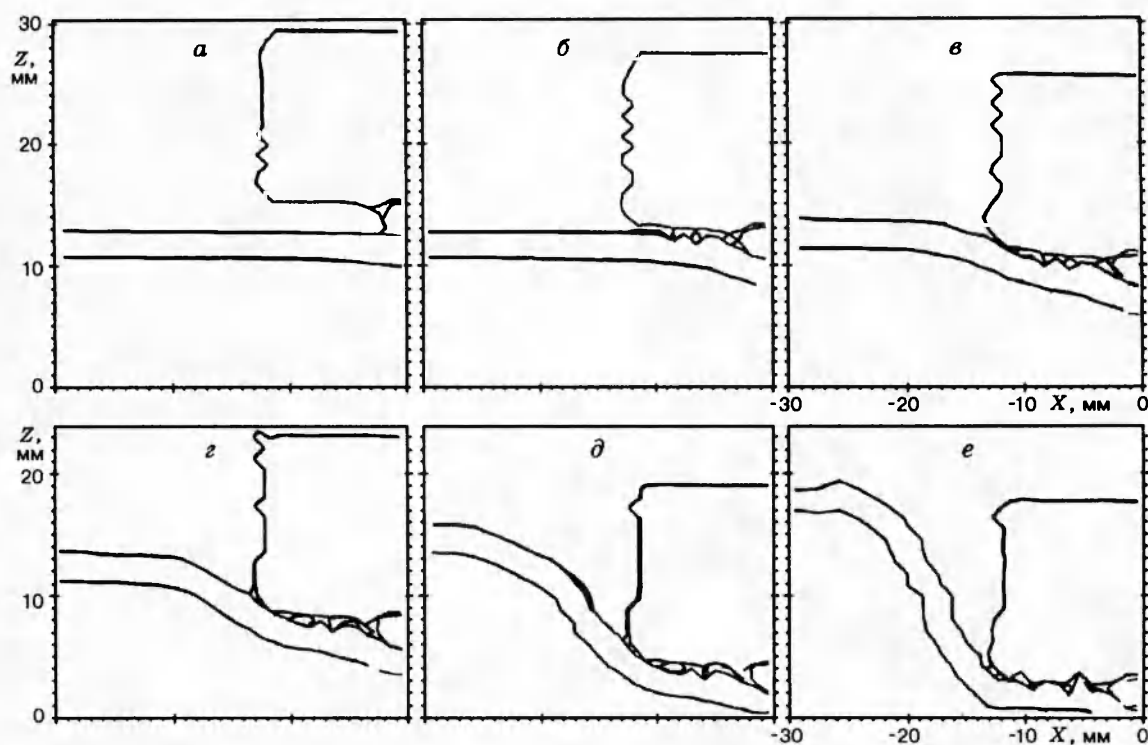


Рис. 8. Геометрия системы в сечении  $Y = 0$  в те же моменты времени, что и на рис. 7

компонентов. В комплексе ТРЭК этот метод обобщен на трехмерный случай и реализован последовательно для всех указанных выше компонентов. Он позволяет локализовать положение контактных границ с точностью до одной счетной ячейки. На внешних границах счетной области могут быть заданы условия непротекания (жесткая стенка) и условия притока (оттока) любого компонента. Кроме того, использование несжимаемого компонента позволяет реализовать условие непротекания внутри счетной области. Это дает возможность моделировать течения в областях практически произвольной конфигурации, в том числе и многосвязных.

Конечно-разностные схемы в комплексе строятся интегриродифференциальным способом, имеют первый порядок аппроксимации по времени и первый или второй порядок по пространственным переменным.

Для иллюстрации возможностей трехмерного моделирования импульсного схлопывания труб с различными жидкостями рассматривалась задача соударения стальной пластины с преградой. Преграда имела форму цилиндрической оболочки (трубы) из стали, заполненной водой. На оболочку натянут стальной обруч, имеющий форму тора. Так как задача имеет две плоскости симметрии, то расчеты проводились на  $1/4$  части предполагаемой начальной геометрии (рис. 6). Считалось, что внешняя среда — вакуум. Стальная пластина имела скорость  $W_z = -220$  м/с. В расчете длина трубы  $R_3 = 40$  мм. На конце трубы задавалось условие свободного вытекания ( $\partial W_n / \partial n = 0$ ). Сетка была квазиравномерной с минимальным размером ячейки 1 мм. Количество точек в расчете  $30 \times 30 \times 37$ .

Результаты расчетов (рис. 7, 8) представлены в виде изолиний объемных концентраций по уровню 0,5, примерно представляющих положение границ раздела веществ. Графики иллюстрируют динамику процесса деформирования как в ударнике, так и в преграде по направлению движения ударника. На рис. 7,е, 8,е показано положение системы в



момент окончания счета. Труба перекрывается без нарушения ее сплошности вне области контакта с ударником. Анализ полученных численных результатов показывает, что достижимо полное перекрытие трубопровода, когда жидкость имеет возможность перемещаться вдоль трубопровода. Эти расчетные результаты качественно согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

Отметим, что используемая методика ТРЭК позволяет оптимизировать различные элементы устройства перекрытия и моделировать процессы динамического перекрытия трубопроводов в аварийных ситуациях при транспортировке горючих и химически вредных жидкостей, когда экспериментальное моделирование сопряжено со значительными техническими трудностями. Для удобства предполагается создание лагранжево-эйлеровой методики, в процессе счета которой узлы счетной сетки могут двигаться достаточно произвольно. Кроме того, в задачах подобного типа необходим последовательный учет диссипативных потерь в рамках упруговязкопластической модели [9].

Работа выполнена при поддержке INTAS.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов А. Г., Минеев В. Н., Тюнькин Е. С.** Импульсное схлопывание стальных цилиндрических оболочек // Изв. АН СССР. МТТ. 1982. № 2. С. 183–187.
2. **Огородников В. А.** Особенности импульсного схлопывания стальных цилиндрических оболочек, заполненных водой // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 2. С. 153–155.
3. **Freund H. U., Hollenberg K., Honcia G.** Sprengtechnischer Schellverschluss zur Notfallabschaltung von Rohrleitungen // Technische Überwachung. 1988. Bd 29. S. 332–334.
4. **Огородников В. А., Григорьев В. А., Мишуков В. В.** Способ перекрытия трубопровода. Заявка на изобретение № 94044764 от 20.12.94.
5. **Иванов А. Г., Кочкин Л. И., Огородников В. А., Тюнькин Е. С.** Особенности разгона пластин скользящей ДВ при наличии присоединенной или сосредоточенной массы // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 5. С. 127–129.
6. **Стадник А. Л., Шанин А. А., Янилкин Ю. В.** Эйлерова методика ТРЭК для расчета трехмерных газодинамических течений многокомпонентной среды // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 1994. Вып. 4. С. 71–78.
7. **Янилкин Ю. В., Шанин А. А., Ковалев Н. П. и др.** Комплекс программ ЭГАК для расчетов двумерных течений многокомпонентной среды // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 1993. Вып. 4. С. 69–75.
8. **Бахрах С. М., Глаголева Ю. П., Самигулин М. С. и др.** Расчет газодинамических течений на основе метода концентраций // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 3. С. 566–569.
9. **Огородников В. А., Садовой А. А., Софронов В. Н., Тюнькин Е. С.** Роль диссипативных процессов при обжати цилиндрических оболочек взрывом // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 1993. Вып. 3. С. 97–101.

*Поступила в редакцию 30/X 1995 г.,  
в окончательном варианте — 1/VII 1996 г.*