

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

© М. В. АЛЕКСЕЕВ, И. С. ВОЖАКОВ

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)
(г. Новосибирск)
alekseev@itp.nsc.ru, vozhakov@gmail.com

УДК 532.52:536.423

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ С ПРЕГРАДОЙ ПРИ ТОРЦЕВОМ РАЗРЫВЕ ТРУБОПРОВОДА С ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДОЙ*

INTERACTION OF PRESSURE WAVES WITH AN OBSTACLE AT THE BREAKUP IN THE PIPELINE WITH SUPERHEATED WATER

Выполнено численное моделирование истечения теплоносителя при торцевом разрыве трубопровода высокого давления, описано взаимодействие возникающей волны сжатия с преградой. Представлены результаты расчета динамики осевого профиля давления и давления в центре мишени. Показано, что форма его радиального профиля на мишени представляется в виде «дискообразного» профиля с локальными максимумами на краях. Установлено, что в случае двухфазного истекающего теплоносителя расчетное давление отраженной от преграды волны вблизи сопла меньше теоретического предсказания для идеального газа, а при увеличении расстояния от сопла до преграды различия между расчетными и теоретическими значениями уменьшаются.

The numerical simulation of the coolant outflow at high pressure pipe break is performed, and the interaction of the compression wave with an obstacle is described. The calculated results on the dynamics of the axial pressure profile and the pressure at the center of the target are presented. It is demonstrated that the shape of the radial pressure profile on the target

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект №14-29-00093).

is presented as a “disc-shaped” profile with local peaks at the edges. It is found that in the case of two-phase outflowing coolant the calculated pressure of the wave reflected from the obstacle near the nozzle is less than the theoretical predictions for an ideal gas. With increasing the distance from the nozzle to the obstacle, the differences between the calculated and theoretical values decrease.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Разгерметизация, взрывное вскипание, волна сжатия, воздействие на преграду.

KEY WORDS. Depressurization, flash boiling, compression wave, effect on the obstacle.

Введение

Важнейшей задачей при проектировании энергетических установок является создание конструкции, устойчивой к отклонениям от штатного режима работы, в том числе и разного вида аварий. В частности, в различных энергетических установках используется теплоноситель под высоким давлением, в ходе аварии при разрыве трубопровода может произойти истечение перегретого теплоносителя в атмосферу, что приведет к бурному (взрывному) вскипанию жидкости. Во внешнюю среду при этом пойдет нестационарная волна сжатия [6], которая может повредить другие элементы установки. Наиболее детально, экспериментально и численно схожий процесс генерации ударных волн исследован для импульсных газовых сверхзвуковых струйных течений [5]. Известно, что в начальной стадии истечения газовой импульсной струи происходит формирование ударной волны с последующим формированием стационарной системы ударных волн в потоке «бочкообразной» структуры. Взаимодействие первичной ударной волны и структуры таких волн с преградой, установленной перпендикулярно оси струи, выявило, что начальная [8] стадия взаимодействия существенно отличается от стационарного случая [4] распределением параметров на преграде.

Существует множество экспериментальных исследований стационарного истечения струи перегретого пара на преграду под высоким давлением. Так, в работе [13] были измерены сила воздействия струи на преграду и распределение давления на преграде по радиусу. Показано подобие стационарного истечения перегретого пара со стационарным истечением газовой струи.

Экспериментальное исследование было проведено в работе [12]. Исследовалась зависимость осевого давления на преграду и действующей на нее силы при разных расстояниях от торца трубы для разных теплофизических параметров теплоносителя. Было показано, что в начальной стадии истечения кипящего теплоносителя (времена до 0,2 с) давление на мишени завышено относительно значений при стационарном истечении.

В начальной фазе процесса разгерметизации трубопровода с перегретым теплоносителем происходит падение давления и ускоренное движение теплоносителя, в результате начинается процесс его взрывного вскипания. Таким образом, начальный процесс генерации волны сжатия схож с процессом фор-

мирования ударной волны с помощью ускоренно движущегося поршня. При этом дальнейший процесс истечения теплоносителя определяется его скоростью кипения в канале [3].

Ранее авторами было проведено численное моделирование ударных волн и генерации вихревых структур при нестационарном истечении струи вскипающей жидкости, выполнено сопоставление особенностей эволюции ударных волн и формирования вихревых структур при нестационарном истечении вскипающей воды с соответствующими структурами при нестационарном истечении газа [1].

В работе [2] было проведено численное моделирование процесса формирования и эволюции волны сжатия при взрывном вскипании свободно истекающей струи перегретой жидкости; рассчитаны амплитуды и профили волн при различных временах и типах разрыва; предложено обоснование выбора «парожидкостной» модели окружающей атмосферы; показано, что тип разрыва (способ раскрытия диафрагмы) принципиально влияет на форму и амплитуду волны сжатия и разрежения.

Целью данной работы является расчетно-теоретическое моделирование, а также анализ процесса формирования и эволюции волн сжатия в присутствии неподвижной преграды.

Модели и методика расчета

В настоящем исследовании рассматривается осесимметричная задача об истечении кипящего теплоносителя из торца трубы на неподвижную преграду. Задача описывается уравнениями Эйлера [7] совместно с уравнениями неразрывности и энергии для двухфазной гомогенной смеси. При этом предполагается, что параметры паровой фазы соответствуют равновесию, а жидкой фазы — метастабильному состоянию. Для замыкания системы уравнений используется уравнение состояния смеси в форме связи давления, плотности и удельной внутренней энергии. Подробное описание модели представлено в работах [1, 2].

Процесс неравновесного кипения перегретого теплоносителя описан при помощи релаксационной модели, которая по двум параметрам (температура и давление) определяет скорость фазового перехода. Модель релаксации получена в работе [10] на основе экспериментальных данных.

Решение исходной дивергентной системы уравнений получено посредством пакета программ [9], использующего метод конечных объемов вкупе с методом коррекции потоков FCT. Времена расчета соответствуют характерным волновым временам, и хотя эффекты турбулентности на таких временах не успевают проявиться, решение модельных уравнений этим методом эквивалентно применению некоторой подсеточной модели турбулентности [11].

Моделирование истечения жидкости из сосуда требует одновременного расчета течения в сосуде, в трубопроводе и во внешней области. Для сопряжения течения в сосуде и в трубопроводе применяется упрощенная «модель входного участка» [2], при которой движение несжимаемой среды описыва-

ется одномерным интегралом Коши-Лагранжа и позволяет рассчитать давление и скорость жидкости при известном давлении в сосуде. При моделировании внешней среды было сделано предположение о том, что истечение пароводяной смеси происходит в пространство, заполненное при атмосферном давлении влажным насыщенным паром с плотностью, равной плотности воздушной атмосферы при температуре 20°C. Валидация модели внешней среды выполнена в работе [2].

Результаты расчетов

В работе проведено численное моделирование генерации волн давления, вызванных взрывным вскипанием воды при торцевом разрыве трубопровода, их распространение и взаимодействие с твердой преградой. Начальные условия численного эксперимента были схожи с условиями, полученными ранее при отсутствии твердой преграды [2]. Начальное давление и температура для жидкости в канале $P_0 = 15,5$ МПа и $T_0 = 270^\circ\text{C}$. Внутренний диаметр трубопровода $D = 0,04$ м. Время раскрытия диафрагмы составляло $\Delta t_d = 0,01$ мс. Раскрытие диафрагмы происходило от оси. Преграда находилась на расстоянии 1D, 3D и 5D от торца канала. Диаметр преграды составлял 10D. На представленных ниже рисунках расстояние от сопла до преграды — 5D.

На рисунке 1 изображена эволюция нормированного градиента давления после разрыва диафрагмы в разные моменты времени. В начальный момент происходит генерация и распространение волны сжатия, за которой следует формирование зоны разрежения $t = 0,0-0,45$ мс (рис. 1а-1в). Схожая картина наблюдалась в расчете без преграды [2]. Подтверждение данного факта иллюстрируется осевыми профилями давления, полученными в расчете без преграды и с ней.

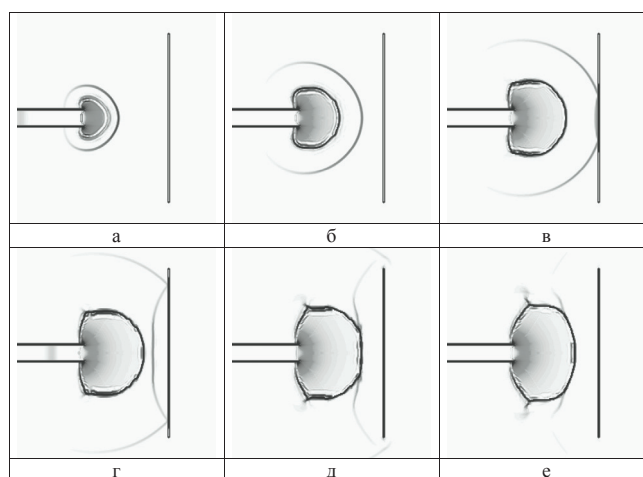


Рис. 1. Поля нормированного градиента давления в разные моменты времени: а — $t = 0,15$ мс, б — $t = 0,30$ мс, в — $t = 0,45$ мс, г — $t = 0,60$ мс, д — $t = 0,75$ мс, е — $t = 0,90$ мс

На рисунке 2а представлены осевые профили давления, полученные в расчете без преграды [2], на рисунке 2б — с преградой. В начале расчета $t = 0,15$ и $t = 0,3$ мс (рис. 2, линия 1, 2) профили давления совпадают. Во внешнее пространство распространяется волна сжатия, за ней формируется зона пониженного давления. В момент времени $t = 0,45$ мс (рис. 2б, линия 3) происходит отражение волны сжатия от преграды, при этом амплитуда волны удваивается. В отсутствие преграды (рис. 2а, линия 3) волна сжатия продолжает расширяться с убыванием амплитуды. Тот же эффект можно наблюдать при рассмотрении эволюции давления на оси на расстоянии 5D в присутствии преграды и без нее (рис. 3).

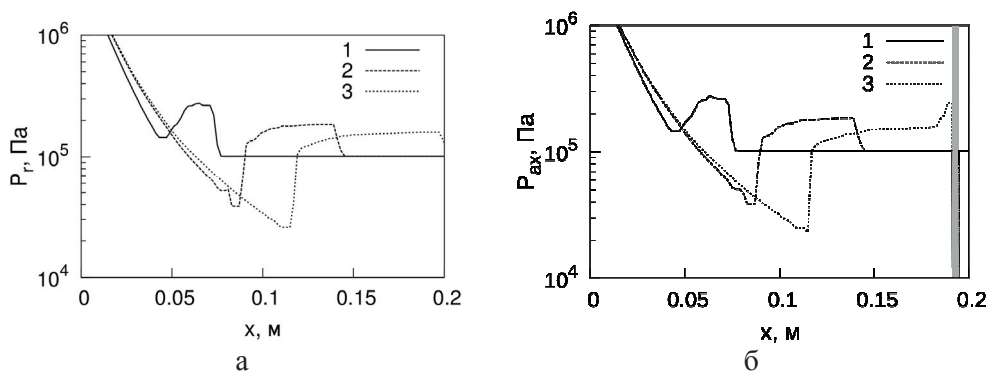


Рис. 2. Осевые профили давления в разные моменты времени: а — без преграды, б — с преградой; 1 — $t = 0,15$ мс, 2 — $t = 0,30$ мс, 3 — $t = 0,45$ мс

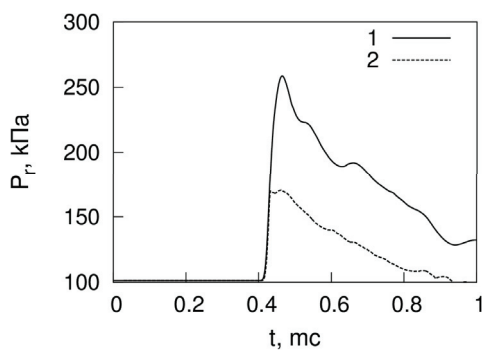


Рис. 3. Динамика давления на оси мишени — 1 и на том же расстоянии без мишени — 2

Известно, что амплитуда отраженной от плоской стенки ударной волны, распространяющейся в идеальном газе с показателем адиабаты γ , может быть найдена через давление падающей волны [7]:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{(3\gamma - 1)\frac{p_1}{p_0} - \gamma + 1}{(\gamma - 1)\frac{p_1}{p_0} + \gamma + 1} \quad (1)$$

Здесь p_0 — давление невозмущенной среды, p_1 — давление позади падающей волны, p_2 — давление позади отраженной волны.

Из выражения (1), в случае волны малой амплитуды получается известный из линейной акустики результат — амплитуда волны после отражения от преграды удваивается. Для сильно нелинейных волн, когда $(p_1/p_0) \geq p_0$, амплитуда волны после отражения может многократно превышать амплитуду падающей волны.

Результаты расчета параметров падающей и отраженной волн при различных расстояниях от сопла до преграды а также расчетные значения отраженной волны p_2^* , рассчитанные по формуле (1), представлены в таблице 1. Можно увидеть, что при небольшом расстоянии от сопла до преграды различия между предсказанным значением давления отраженной волны и расчетными данными значительны. В данном случае сказывается близость сопла и влияние кипения истекающего теплоносителя. При удалении от сопла амплитуда волн падает, а различия между предсказанными значениями давления отраженной волны и расчетными уменьшаются.

Таблица 1

**Параметры падающей и отраженной волн
в зависимости от расстояния до преграды**

Расстояние до преграды	p_2 , Па	p_2^* , Па	$(p_2^* - p_2)/p_2$	p_1 , Па	p_0 , Па
1D	857500	1061090	0,192	365750	101315
3D	429120	438280	0,02	219300	101315
5D	244750	245180	0,002	159860	101315

После отражения от преграды волна сжатия начинает распространяться в сторону сопла, а также вдоль радиуса преграды (рис. 1 г-е). Данная эволюция хорошо прослеживается на радиальных профилях давления (рис. 4). В момент времени $t = 0,464$ мс (рис. 4, линия 1) профиль давления соответствует максимуму амплитуды давления в центре мишени (рис. 3, линия 1). После происходит распространение волны сжатия вдоль радиуса. Форма профиля давления на мишени представляется в виде «дискообразного» профиля с локальными максимумами на краях. При распространении волны сжатия вдоль мишени амплитуда центральной части диска и локальных максимумов на краях падает (рис. 4 линия 2-5).

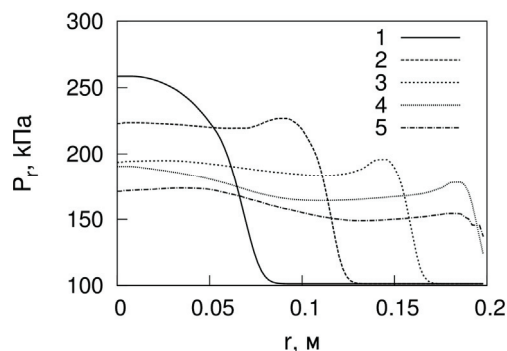


Рис. 4. Радиальный профиль давления на мишени в разные моменты времени.

1 — $t = 0,464$ мс, 2 — $t = 0,525$ мс, 3 — $t = 0,600$ мс,
4 — $t = 0,675$ мс, 5 — $t = 0,700$ мс

Выводы

На основе неравновесной релаксационной модели проведено численное моделирование процесса формирования и эволюции волны сжатия на преграде, полученное при взрывном вскипании теплоносителя, вызванного торцевым разрывом трубопровода высокого давления. Рассчитаны амплитуды и профили волн сжатия как на оси симметрии, так и вдоль радиуса преграды при различных временах. Показано, что форма радиального профиля давления на мишени представляется в виде «дискообразного» профиля с локальными максимумами на краях. Установлено, что расчетное давление отраженной от преграды волны вблизи сопла меньше теоретически предсказанного для идеального газа, а при удалении различия между расчетным и теоретическим значениями уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев М. В. Генерация ударноволновых и вихревых структур при истечении струи вскипающей воды / М. В. Алексеев, С. И. Лежнин, Н. А. Прибатурин, А. Л. Сорокин // Теплофизика и аэромеханика. 2014. № 6. С. 795-798.
2. Алексеев М. В. Формирование и эволюция волн при торцевом разрыве трубопровода со вскипающим теплоносителем / М. В. Алексеев, С. И. Лежнин, Н. А. Прибатурин // Вестник ТюмГУ. Физико-математическое моделирование. 2015. Том 1. № 2(2). С. 75-84.
3. Болотнова Р. Х. Пространственное моделирование нестационарной стадии истечения вскипающей жидкости из камер высокого давления / Р. Х. Болотнова, В. А. Бузина // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7. № 4. С. 343-352.
4. Гинзбург И. П. Типы волновой структуры при взаимодействии недорасширенной струи с безграничной плоской преградой / И. П. Гинзбург, Е. И. Соколов, В. Н. Усков // ЖПМТФ. 1976. № 1. С. 45-52

5. Голуб В. В. Импульсные сверхзвуковые струйные течения / В. В. Голуб, Т. В. Баженова. М.: Наука, 2008. 279 с.
6. Гофман Г. В. Нестационарное волновое истечение вскипающей жидкости из сосудов / Г. В. Гофман, А. Е. Крошилин, Б. И. Нигматулин // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19. № 6. С. 1240-1250.
7. Ландау Л. Д. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1986. Т. 6. Теоретическая физика. 733 с.
8. Серова В. Д. О взаимодействии начальной стадии струи с плоской преградой / В. Д. Серова // Газодинамика и теплообмен. Ленинград: Изд-во ЛГУ. 1981. № 6. С. 121-130.
9. Boris J. P. LCPFCT — Flux-corrected transport algorithm for solving generalized continuity equations / J. P. Boris, A. M. Landsberg, E. S. Oran, J. H. Garder // NRL/MR/6410-93-7192.
10. Downar-Zapolski P. The non-equilibrium relaxation model for one-dimensional liquid flow / P. Downar-Zapolski, Z. Bilicky, L. Bolle, J. Franco // Int. J. Multiphase Flow. 1996. Vol. 22. No 3. Pp. 473-483.
11. Grinstein F. F. Implicit Large Eddy Simulation of High-Re Flows with Flux-Limiting Schemes / F. F. Grinstein, Ch. Fureby // AIAA 2003-4100, AIAA CFD Conference (June 23-26). Orlando, FL, 2003.
12. Isovaki T. Experimental study of jet discharging test results under BWR and PWR loss of coolant accident conditions / T. Isovaki, S. Miyazono // Nuclear Engineering and Design. 1986. Vol. 96. Pp. 1-9.
13. Masuda F. Experimental study on an impingement high-pressure steam jet / F. Masuda // Nuclear Engineering and Design. 1982. Vol. 67. No 2. Pp. 273-286.

REFERENCES

1. Alekseev M. V., Lezhnin S. I., Pribaturin N. A., Sorokin A. L. Gereratsiya udarnovolnovuh i vihrevuh struktur pri istechenii strui vskipajushchej vodu [Generation of Shockwave and Vortex Structures at the Outflow of a Boiling Water Jet] // Teplofizika i aeromehanika [Thermophysics and Aeromechanics]. 2014. Vol. 21. No 6. Pp. 763-766. (In Russian)
2. Alekseev M. V., Lezhnin S. I., Pribaturin N. A. Formirovanie i jevoljucija voln pri torcevom razryve truboprovoda so vskipajushhim teplonositelem [The Waves Formation and Evolution in the Pipeline Break under Boiling Coolant] // Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, jenergetika [Tyumen State University Herald. Physico-Mathematical Modeling. Oil, Gas and Energy Engineering]. 2015. Vol. 1. No 2(2). Pp.75-84 (In Russian)
3. Bolotnova R. Kh., Buzina V. A. Prostranstvennoe modelirovanie nestacionarnoj stadii istechenija vskipajushhej zhidkosti iz kamer vysokogo davlenija [Spatial Modeling of the Nonstationary Processes of Boiling Liquid Outflows from High Pressure Vessels] // Vychislitel'naja mehanika sploshnyh sred [Computational Continuum Mechanics]. 2014. Vol. 7. No 4. Pp. 343-352. (In Russian)
4. Ginzburg I. P., Sokolov E. I., Uskov V. N. Tipu volnovoj struktury pri vzaimodeistvii nedorasshirennoj strui s bezgranichnoj ploskoj pregradoj [Types of Wave Structure in the Interaction of a Convergent Jet with an Infinite Two-dimensional Obstruction] //

- JPMTF [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 1976. Vol. 17. No 1. Pp. 35-39. (In Russian)
5. Golub V. V., Bazhenova T. V. Impul'snye sverhzvukovye strujnye techenija [Impulse Supersonic Jet Streams]. M.: Nauka [Science], 2008. 279 p. (In Russian)
 6. Gofman G. V., Kroshilin A. E., Nigmatulin B. I. Nestacionarnoe volnovoe istechenie vskipajushhej zhidkosti iz sudov [Nonsteady Wave Emission of Effervescent Liquid from Vessels] // Teplofizika vysokih temperature [High Temperature]. 1981. Vol. 19. No 6. Pp. 1240-1250. (In Russian)
 7. Landau L. D., Lifshic E. M. Gidrodinamika (Teoreticheskaja fizika) [Hydrodynamics (Theoretical Physics)]. M.: Nauka [Science]. 1986. Vol. 6. 733 p. (In Russian)
 8. Serova V. D. O vzaimodejstvii nachal'noj stadii strui s ploskoj pregradoj [On the Interaction of the Initial Stage of the Stream with a Flat Barrier] // Gazodinamika i teploobmen [Gasdynamics and Heat Exchange]. Leningrad: Izdatel'stvo LGU (Leningrad State University Publishing House). 1981. No 6. Pp. 121-130 (In Russian)
 9. Boris J. P., Landsberg A. M., Oran E. S., Garder J. H. LCPFCT — Flux-corrected transport algorithm for solving generalized continuity equations // NRL/MR/6410-93-7192.
 10. Downar-Zapolski P., Bilicky Z., Bolle L., Franco J. The non-equilibrium relaxation model for one-dimensional liquid flow // Int. J. Multiphase Flow. 1996. Vol. 22. No 3. Pp. 473-483.
 11. Grinstein F. F., Fureby Ch. Implicit Large Eddy Simulation of High-Re Flows with Flux-Limiting Schemes // AIAA 2003-4100, AIAA CFD Conference (June 23-26). Orlando, FL, 2003.
 12. Isozaki T., Miyazono S. Experimental study of jet discharging test results under BWR and PWR loss of coolant accident conditions // Nuclear Engineering and Design. 1986. Vol. 96. Pp. 1-9.
 13. Masuda F. Experimental study on an impingement high-pressure steam jet // Nuclear Engineering and Design. 1982. Vol. 67. No 2. Pp. 273-286.

Авторы публикации

Алексеев Максим Валерьевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (г. Новосибирск)

Вожяков Иван Сергеевич — младший научный сотрудник Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (г. Новосибирск)

Authors of the publication

Maxim V. Alekseev — Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher at the Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences named after S. S. Kutateladze (Novosibirsk)

Ivan S. Vozhakov — Junior Researcher at the Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences named after S. S. Kutateladze (Novosibirsk)