

Верификация программного средства ТОХИ+Гидроудар для моделирования нестационарных процессов в трубопроводах¹



А.М. Сверчков,
науч. сотрудник,
sverchkov@safety.ru

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия



С.И. Сумской,
канд. техн. наук,
ст. преподаватель

НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Указана необходимость разработки соответствующих математических моделей и численных методов решения задачи о гидроударе, в том числе в приложении к расчету интенсивности выброса транспортируемого вещества в результате аварийных ситуаций на трубопроводах. В этих целях предложено использовать метод С.К. Годунова, который реализован в виде программного средства ТОХИ+Гидроудар. Проведена верификация программного средства по результатам натурального эксперимента и решения модельной задачи.

Ключевые слова: ТОХИ+Гидроудар, программные продукты, переходные процессы, метод С.К. Годунова, гидроудар, трубопроводный транспорт, разгерметизация трубопровода.
DOI: 10.24000/0409-2961-2017-10-5-10

Введение

Вот уже более 20 лет в нашей стране интенсивно развивают направление промышленной безопасности, связанное с анализом риска объектов трубопроводного транспорта. Результаты многолетней апробации разработанных подходов на ряде таких объектов представлены во множестве публикаций, например [1–4].

Процедура проведения количественного анализа риска состоит из двух частей: оценки частоты событий и оценки последствий. Следует отметить, что оценка последствий аварий на объектах трубопроводного транспорта имеет существенную специфику: расчет интенсивности выброса опасного вещества из трубопровода — достаточно сложная задача, поскольку необходимо учитывать возникающую при этом циркуляцию волн сжатия-разрежения, в значительной степени определяющих интенсивность выброса. Таким образом, при расчете последствий аварий следует решать задачу о движении опасного вещества в протяженном трубопроводе, на котором функционирует оборудование различного типа (здвижки, насосы, емкости и пр.), а сам трубопровод имеет многочисленные подъемы и спуски.

Указанную задачу, как правило, решают с помощью прямого численного моделирования на основе системы дифференциальных уравнений, описывающих одномерное нестационарное движение слабосжимаемой жидкости. Именно поэтому неоспоримы важность и необходимость разработки

математических моделей и процедур для достижения сформулированной цели.

Для решения задач описания аварийного истечения и гидроудара специалистами закрытого акционерного общества «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности» (ЗАО НТЦ ПБ) создана математическая модель и предложен численный метод [5], где приведен пример расчета гипотетической аварийной разгерметизации трубопровода. Эта же методология была успешно применена и к расчету гидроудара: работы [6–9] ярко демонстрируют возможность прямого численного моделирования. Учитывая простоту реализации численных методов [5, 7–9] и высокое качество получаемых решений, можно уверенно говорить о большом потенциале данного подхода.

В ЗАО НТЦ ПБ на протяжении нескольких лет разрабатывают программное средство (ПС) ТОХИ+Гидроудар, использующее метод С.К. Годунова для численного решения задачи о течении жидкости в трубопроводе [10]. Моделирование гидроудара особо важно в случаях быстрого срабатывания запорной арматуры, т.е. в ситуации, когда на момент полного закрытия задвижки волна прошла сравнительно небольшую часть длины трубопровода. Для трасс длиной от единиц до десятков километров быстрым станет закрытие за несколько секунд, для трасс в сотни километров — за несколько десятков секунд. Такое быстрое срабатывание запорной арматуры и полное перекрытие потока могут спровоцировать аварийную ситуацию, сопровождаемую ростом давления, разрушением трубопровода и неконтролируемым выбросом из него транспортируемого продукта, который может попасть, например,

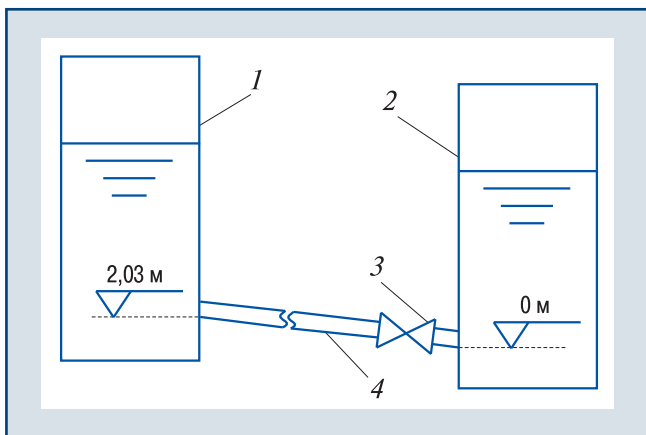
¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-19-00188).

в водную среду, что чревато большим экологическим ущербом.

Чтобы полноправно использовать упомянутые выше математическую модель и реализованный алгоритм численного решения задачи моделирования нестационарных процессов, возникающих при транспортировании жидких сред по трубопроводу, рассмотрим апробацию ПС ТОХИ+Гидроудар на реальном эксперименте и сравним полученные численные результаты как с данными этого эксперимента, так и с результатами численного моделирования в рамках других исследований.

Верификация модели

В настоящее время существует ряд публикаций, в том числе иностранных [11–13], посвященных натурным экспериментам, которые демонстрируют явление гидроудара. Для верификации математической модели, реализованной в ПС ТОХИ+Гидроудар, воспользуемся данными реального эксперимента [11]. Конфигурация оборудования в опыте представлена на рис. 1. Медная труба 4, соединяющая верхний резервуар 1 под давлением для подачи воды и нижний резервуар 2 для приема воды, имеет небольшой наклон (перепад высотных отметок в начале и конце трубы составляет 2,03 м). Длина трубопровода — 37,2 м, диаметр — 22 мм, толщина стенки — 1,63 мм. Быстродействующая задвижка 3 расположена на конце трубопровода перед нижним резервуаром 2. В стационарном режиме вода в трубе течет со скоростью 0,3 м/с, давление в верхнем резервуаре составляет 0,31 МПа (32 м вод. ст.), время закрытия медного шарового крана — 0,009 с, скорость распространения волны гидроудара (по наблюдениям в опытах) — 1319 м/с, температура воды — 15,5 °С.



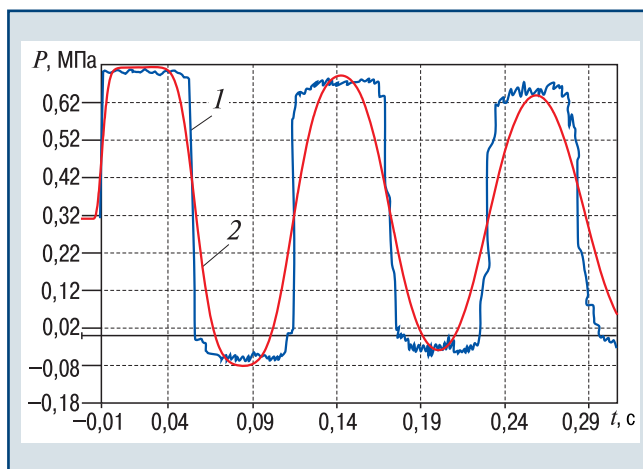
▲ Рис. 1. Конфигурация оборудования для верификации ПС ТОХИ+Гидроудар

▲ Fig. 1. Configuration of the equipment for verification of TOXI+Water-hammer software

При численном моделировании левым граничным условием указано значение давления в верхнем резервуаре. На правой границе сначала (до момента срабатывания быстродействующей задвижки) за-

давали сток с исходной скоростью 0,3 м/с. После срабатывания задвижки правое граничное условие превращается в жесткую стенку, движение жидкости через которую отсутствует¹.

На рис. 2 представлены колебания давления P во времени t в конце трубопровода у закрытой задвижки. Как видно, результаты численного расчета колебаний давления на выходе трубопровода (у задвижки) имеют высокое совпадение с экспериментальными результатами [11]. В численном решении наблюдается некоторое размазывание градиентов P на участках его резкого роста и спада по сравнению с экспериментом. Объяснение этому факту будет дано ниже.



▲ Рис. 2. Колебания давления воды в конце трубопровода (у закрытой быстродействующей задвижки):

1 — данные реального эксперимента; 2 — результаты численного моделирования с помощью ПС ТОХИ+Гидроудар

Fig. 2. Fluctuations of water pressure at the end of the pipeline (near the closed quick-opening gate valve):

1 — real experiment data; 2 — the results of numerical modeling using TOXI+Water-hammer

Сравнение расчетов

по ПС ТОХИ+Гидроудар с моделированием гидроудара в трехмерной постановке

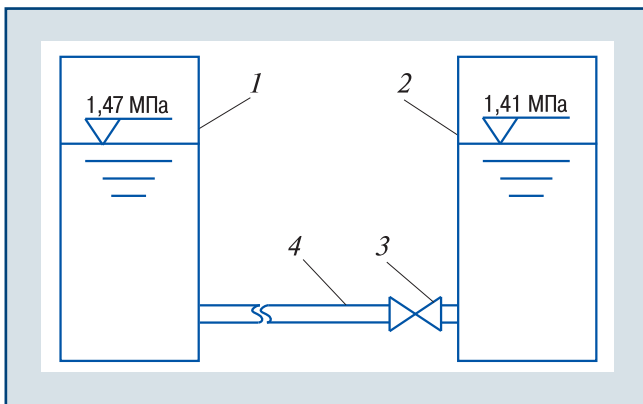
Поскольку в эксперименте можно измерить не все параметры, возникает вопрос, как оценить точность расчета того или иного параметра, не имея по нему экспериментальных данных, тем более что течение в трубопроводе неоднородно, скорость потока не постоянна, а изменяется по сечению трубы. В предлагаемой модели скорости приписывают усредненную по сечению трубы величину. Возникает еще один вопрос: а насколько точно проведено это усреднение? Ответ на него может дать детальное и достоверное трехмерное моделирование. Таким образом, правильность разработанной модели подтверждают

¹ Для определения коэффициента трения в ПС ТОХИ+Гидроудар использована зависимость Колбрука — Уайта [2, 14], связывающая коэффициент трения с числом Рейнольдса и характеристиками трубопровода (диаметр и шероховатость).

не только экспериментальные данные, но и результаты более точных и достоверных расчетов.

В качестве эталонной (с точки зрения получения дополнительного верификационного материала) выбрана модель трехмерного течения вязкой жидкости, описанная в [11]. Соответственно, и представленные в [11] результаты сравнивались с проводимыми расчетами.

В рамках изложенного подхода для апробации ПС ТОХИ+Гидроудар предлагается смоделировать задачи, описанные в [11]. Конфигурация оборудования представлена на рис. 3. Давление в начальном резервуаре 1 составляет 1,47 МПа (150 м вод. ст.), давление в конечном резервуаре 2 — 1,41 МПа (143,45 м вод. ст.), они соединены горизонтальным трубопроводом 4 длиной 600 м и диаметром 1 м с быстродействующей задвижкой 3. Скорость распространения волны гидроудара — 1200 м/с. В стационарном режиме скорость течения среды в трубе составляет 14,25 м/с. При расчете по ПС ТОХИ+Гидроудар силой трения на стенках трубы пренебрегали.



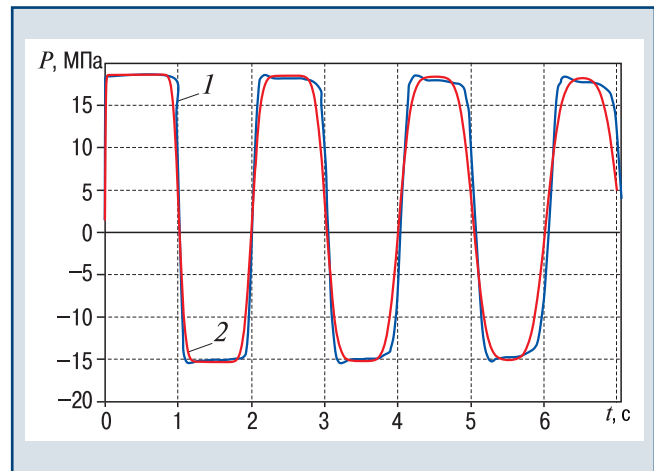
▲ Рис. 3. Конфигурация оборудования для моделирования гидроудара в трубопроводе с быстродействующей задвижкой

▲ Fig. 3. The configuration of the equipment for modelling of water-hammer in the pipeline with quick-opening gate valve

Анализ результатов

Результаты численного моделирования описанной выше задачи по ПС ТОХИ+Гидроудар и по трехмерному подходу [11] представлены на рис. 4 (зависимость давления P от времени t у закрытого конца трубы) и рис. 5 (зависимость скорости V от времени t в начале трубопровода). Для кривой, соответствующей данным работы [11], использована зависимость скорости V , осредненной по сечению трубопровода, от времени t .

Необходимо отметить, что описанный расчет носит модельный характер, поэтому его следует рассматривать прежде всего как математическое решение. Дело в том, что при разгрузке среды в полученном решении наблюдаются сильные растягивающие напряжения — отрицательные давления

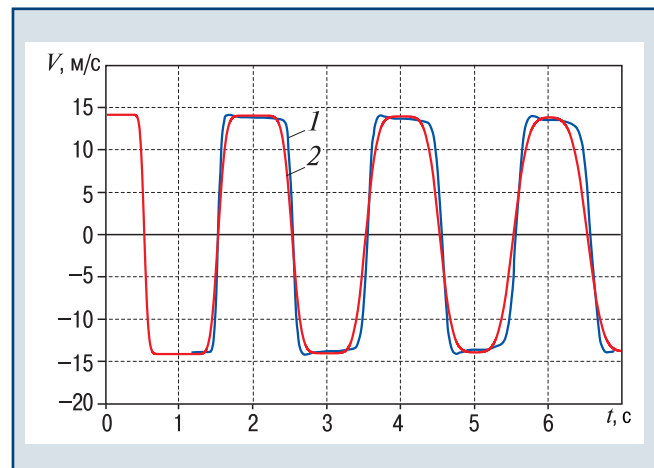


▲ Рис. 4. Колебания давления воды на быстродействующей задвижке:

1 — данные реального эксперимента; 2 — результаты численного моделирования с помощью ПС ТОХИ+Гидроудар

▲ Fig. 4. Fluctuations of water pressure at the quick-opening gate valve:

1 — real experiment data; 2 — the results of numerical modeling using TOXI+Water-hammer



▲ Рис. 5. Колебания скорости движения воды в начале трубопровода:

1 — данные реального эксперимента; 2 — результаты численного моделирования с помощью ПС ТОХИ+Гидроудар

▲ Fig. 5. Fluctuations of water velocity at the beginning of the pipeline:

1 — real experiment data; 2 — the results of numerical modeling using TOXI+Water-hammer

(см. рис. 4). Понятно, что такие давления в жидкой среде со стандартными свойствами существовать не могут: возникнет нарушение сплошности (кавитация), и вместо гомогенного потока чисто жидкой среды образуется гетерогенный поток газопарожидкостной среды. Соответственно, давление в потоке не достигнет существенных отрицательных значений, а окажется на уровне условия зарождения кавитационных явлений, например на уровне давления насыщенного пара. Именно поэтому полученные результаты нужно рассматривать в первую очередь с точки зрения точности описания в рамках

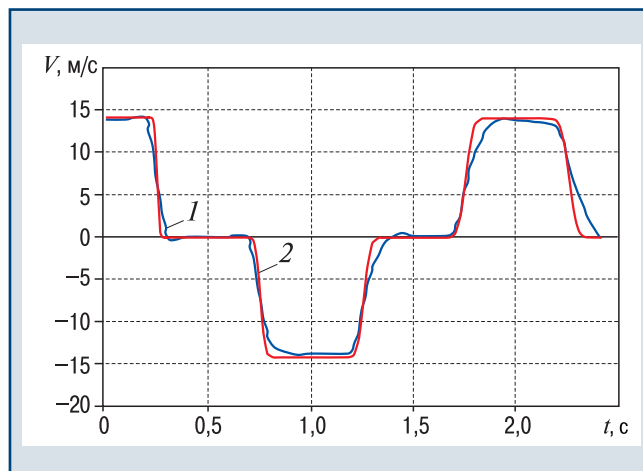
заявленной модели, с точки же зрения соответствия физическим процессам, протекающим при гидроударе, данные результаты можно применять только в той части, где правомерно использование модели слабосжимаемой жидкости, т.е. на первой волне сжатия-разрежения.

Результаты расчета по ПС ТОХИ+Гидроудар и итоги высокоточного математического (CFD) моделирования [11] совпадают не только по давлению, но и по колебаниям скорости (см. рис. 4 и 5). Это весомое подтверждение того, что реализованный в работах [5–9] подход к решению уравнений гидродинамики в одномерном приближении методом С.К. Годунова с использованием ПС ТОХИ+Гидроудар позволяет воспроизвести все существенные характеристики течения, и его можно применять для численного моделирования нестационарных процессов (гидроудар).

График колебаний давления на конце трубопровода (перед задвижкой) показывает, что максимальное и минимальное значения давления гидроудара при одномерном и трехмерном моделировании очень хорошо совпадают на первом этапе распространения волны гидроудара. Но с увеличением времени (циркуляция волн от гидроудара продолжается) возникает незначительное искажение в областях нарастания и спада давления и скорости, а также в областях максимальных и минимальных значений колебаний давления. Основная причина искажений на подъемах и, как следствие, в максимумах и минимумах — численные (схемные) вязкость и диффузия. Такие численные диссипативные эффекты образуются из-за невысокого (первого) порядка точности используемой в ПС ТОХИ+Гидроудар разностной схемы, размытие подъемов и спусков легко устранимо, а качество решения значительно улучшится при повышении порядка точности (например, до второго), что запланировано в рамках дальнейших исследований.

Таким образом, используемые в ПС ТОХИ+Гидроудар одномерные модели вполне точно воспроизводят распределения и зависимости не только давления, но и осредненного значения скорости, изначально имеющей неравномерное распределение по сечению трубы. Подтверждением этому служит зависимость скорости V от времени t в сечении по центру трубопровода: как видно из рис. 6, численные результаты колебаний скорости в данном случае также имеют высокое совпадение с результатами [11]. Однако нестационарный характер изменения скорости выражен здесь более отчетливо по сравнению с аналогичной зависимостью для начала трубопровода.

Чтобы понять нестационарный характер распределения скорости в процессе распространения волны гидроудара, рассмотрим подробнее результаты численного моделирования в середине трубопровода (на удалении 300 м от его начала) для скорости на временном интервале от 0 до 2,5 с (см. рис. 6). Когда скорость направлена вниз по потоку (к концу



▲ Рис. 6. Колебания скорости движения воды в середине трубопровода:

1 — данные реального эксперимента; 2 — результаты численного моделирования с помощью ПС ТОХИ+Гидроудар

▲ Fig. 6. Fluctuations of water velocity in the middle of the pipeline:

1 — real experiment data; 2 — the results of numerical modeling using TOXI+Water-hammer

трубопровода, где расположена задвижка), она имеет положительное значение, когда против потока — отрицательное.

Из анализа численных результатов видно, что за один период волны гидроудара (рост и спад давления) пройдут через середину трубопровода 4 раза: на 0,25; 0,75; 1,25 и 1,75 с. В эти моменты времени скорость потока в середине трубопровода резко изменяется. Пока время не достигло 0,25 с, первая волна гидроудара (волна сжатия от закрытого клапана) еще не дошла до середины трубопровода, поэтому скорость постоянна и равна скорости в стационарном режиме. После прохождения первой волны давление повышается, поток останавливается (скорость становится нулевой). В момент времени 0,75 с волна разрежения от начала трубопровода проходит через его середину: в результате такой разгрузки поток начинает идти в сторону емкости и скорость становится минимальной. В момент времени 1,25 с через середину трубопровода проходит вторая волна разрежения от закрытой задвижки, поток останавливается. Отраженная от емкости на входе вторая волна сжатия в момент времени 1,75 с приходит в середину трубопровода и фактически восстанавливает состояние изначального потока.

Таким образом, осредненная скорость, рассчитанная с помощью ПС ТОХИ+Гидроудар, совпадает с осредненной скоростью потока, полученной при полноценном трехмерном моделировании не только на входе трубопровода, но и в промежуточной точке между его входом и выходом.

Заключение

Достигнуто удовлетворительное согласование между расчетными (с помощью ПС ТОХИ+Гидро-

удар) и экспериментальными данными по пульсациям давления в трубе. На конкретном примере успешно продемонстрировано совпадение результатов, полученных с помощью разработанной математической модели и на основе высокоточного трехмерного численного моделирования гидроудара [11].

Показана хорошая точность используемого численного метода, определены дальнейшие пути улучшения качества численных решений в ПС ТОХИ+Гидроудар.

Подтверждена правомерность использования ПС ТОХИ+Гидроудар (в том числе заложенных в нем математических моделей и численных процедур для их решения) для моделирования движения жидкости в протяженном трубопроводе в целях расчета как параметров течения, так и интенсивности выброса вещества в результате аварийной ситуации с учетом возникновения циркуляции волн сжатия и разрежения, которые в значительной степени определяют интенсивность выброса.

Список литературы

1. Оценка риска аварий на магистральных нефтепроводах КТК-Р и БТС/ Ю.А. Дадонов, М.В. Лисанов, А.И. Гражданкин и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2002. — № 6. — С. 2–6.
2. Жулина С.А., Лисанов М.В., Савина А.В. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах// Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 1. — С. 50–55.
3. Оценка риска аварий на линейной части магистральных нефтепроводов/ М.В. Лисанов, А.С. Печеркин, В.И. Сидоров и др.// Безопасность труда в промышленности. — 1998. — № 9. — С. 50–56.
4. Анализ риска аварий на нефтепроводных системах КТК-Р и БТС/ А.И. Гражданкин, Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов и др.// Безопасность жизнедеятельности. — 2002. — № 6. — С. 17.
5. Sumskoi S.I., Sverchkov A.M. Modeling of non-equilibrium processes in oil trunk pipeline using Godunov type method// Physics Procedia. — 2015. — Vol. 72. — P. 347–350. DOI: 10.1016/J.PHRO.2015.09.108
6. Моделирование аварийных утечек на магистральных нефтепроводах/ С.И. Сумской, А.А. Агапов, А.С. Софьин и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2014. — № 9. — С. 50–53.
7. Моделирование гидроудара в разветвленных трубопроводных системах/ С.И. Сумской, М.В. Лисанов, А.А. Агапов и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 10. — С. 60–66.
8. Modelling of non-equilibrium flow in the branched pipeline systems/ S.I. Sumskoi, A.M. Sverchkov, M.V. Lisanov, A.F. Egorov// Journal of Physics: Conference Series 751. — 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/751/1/012022
9. Simulation of systems for shock wave/compression waves damping in technological plants/ S.I. Sumskoi, A.M. Sverchkov, M.V. Lisanov, A.F. Egorov// Journal of Physics: Conference Series 751. — 2016. DOI:10.1088/1742-6596/751/1/012023

10. Годунов С.К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики// Математический сборник. — 1959. — Т. 47 (89). — № 3. — С. 271–306.

11. Jinping L., Peng W., Jiandong Y. CFD Numerical simulation of water hammer in pipeline based on the Navier-Stokes equation// V European Conference on Computational Fluid Dynamics. — Lisbon, 2010.

12. Investigation of water hammer effect through pipeline system/ T.W. Choon, L.K. Aik, L.E. Aik, T.T. Hin// International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology. — 2012. — Vol. 2. — № 3. — P. 48–53.

13. Experimental study of water hammer phenomena in drinking water pipeline distribution using video camera method/ A. Maryono, Suhanan, A. Kurniawan et al.// International Journal of Scientific & Engineering Research. — 2013. — Vol. 4. — Iss. 2. — P. 1–8.

14. Миркин А.З., Усинуш В.В. Трубопроводные системы: справочник. — М.: Химия, 1991. — 256 с.

sverchkov@safety.ru

Материал поступил в редакцию 28 августа 2017 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2017, № 10, pp. 5–10.
DOI: 10.24000/0409-2961-2017-10-5-10

Verification of TOXI+Water-Hammer Software for Modelling of Non-Stationary Processes in the Pipelines

Information about the Author

A.M. Sverchkov, Researcher, sverchkov@safety.ru
STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia
S.I. Sumskoy, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer
NRNU MEPhI, Moscow, Russia

Abstract

Need in the development of the corresponding mathematical models and numerical methods of solution of the task on water-hammer, including in the Annex to the calculation of the transported substances emission intensity as a result of emergencies at the pipelines is specified hereby. For this purpose, it is proposed to use the method of S.K. Godunov, which is implemented in the form of TOXI+Water-hammer software. The software verification based on the results of natural experiment and the solution of the model task was carried out. Satisfactory coordination was achieved between the calculated (by means of TOXI+Water-hammer) and experimental data on pressure pulsations in the pipe. On the concrete example the conformity of the results was successfully demonstrated, which were obtained using the developed mathematical model, and on the basis of high-precision three-dimensional numerical modeling of water-hammer.

Good accuracy of the used numerical method is shown, further ways of improvement of quality of the numerical decisions implemented in TOXI+Water-hammer impact are defined. The legitimacy is confirmed concerning this software use for modelling of liquid movement in the extended pipeline for the purpose of calculation of both the flow current parameters, and the intensity of substance emission as a result of an emergency situation taking into account the emergence of circulation of the compression waves and discharge, which substantially define the intensity of emissions.

Key words: TOXI+Water-hammer, software products, transition processes, S.K. Godunov method, water-hammer, pipeline transport, pipeline depressurization.

References

1. Dadonov Yu.A., Lisanov M.V., Grazhdankin A.I., Pecherkin A.S., Sidorov V.I., Degtyarev D.V., Sumskoy S.I. Accidents risk assessment at KTK-R and BTS main pipelines. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2002. № 6. pp. 2–6.
2. Zhulina S.A., Lisanov M.V., Savina A.V. Guidelines on accidents risk level assessment at the trunk oil pipelines and oil products pipelines. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2013. № 1. pp. 50–55.
3. Lisanov M.V., Pecherkin A.S., Sidorov V.I., Shvryayev A.A., Safonov V.S., Nazarov N.P., Anisimov S.M., Borno O.I., Tolmachev I.V. Acci-

dents risk assessment at the linear part of the trunk oil pipelines. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 1998. № 9. pp. 50–56.

4. Grazhdankin A.I., Degtyarev D.V., Lisanov M.V., Pecherkin A.S., Sidorov V.I. Accidents risk assessment at KTK-R and BTS oil pipeline system. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti = Life Safety*. 2002. № 6. p. 17.

5. Sumskoj S.I., Sverchkov A.M. Modeling of non-equilibrium processes in oil trunk pipeline using Godunov type method. *Physics Procedia*. 2015. Vol. 72. pp. 347–350. DOI: 10.1016/J.PHPRO.2015.09.108

6. Sumskoj S.I., Agapov A.A., Sofin A.S., Sverchkov A.M., Egorov A.F. Modelling of emergency leaks at the trunk oil pipelines. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2014. № 9. pp. 50–53.

7. Sumskoj S.I., Lisanov M.V., Agapov A.A., Sofin A.S., Sverchkov A.M., Egorov A.F. Modeling of water-hammer in branched pipeline systems. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2015. № 10. pp. 60–66.

8. Sumskoj S.I., Sverchkov A.M., Lisanov M.V., Egorov A.F. Modelling of non-equilibrium flow in the branched pipeline systems. *Journal of Physics: Conference Series* 751. 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/751/1/012022

9. Sumskoj S.I., Sverchkov A.M., Lisanov M.V., Egorov A.F. Simulation of systems for shock wave/compression waves damping in technological plants. *Journal of Physics: Conference Series* 751. 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/751/1/012023

10. Godunov S.K. Differential method of numerical calculation for discontinuous solutions of hydrodynamics equations. *Matematicheskii Sbornik = Sbornik: Mathematics*. 1959. Vol. 47 (89). № 3. pp. 271–306.

11. Jinping L., Peng W., Jiandong Y. CFD Numerical simulation of water hammer in pipeline based on the Navier-Stokes equation. V European Conference on Computational Fluid Dynamics. Lisbon, 2010.

12. Choon T.W., Aik L.K., Aik L.E., Hin T.T. Investigation of water hammer effect through pipeline system. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*. 2012. Vol. 2. № 3. pp. 48–53.

13. Maryono A., Suhanan, Kurniawan A., Alatas M., Ridho Akhita A.M., Wicaksono A.B. Experimental study of water hammer phenomena in drinking water pipeline distribution using video camera method. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2013. Vol. 4. Iss. 2. pp. 1–8.

14. Mirkin A.Z., Usinsh V.V. *Truboprovodnyye sistemy: spravochnik* (Pipeline Systems: Guide). Moscow: Khimiya, 1991. 256 p.

По страницам научно-технических журналов // октябрь 2017 г.

Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов (специализированный научный журнал)

Гадельшин Р.З. Плавающие покрытия резервуаров: анализ эффективности и направления совершенствования. — 2017. — № 4.

Приведена классификация внутренних плавающих покрытий (ВПП) резервуаров, выполнен анализ зарубежных нормативных документов и публикаций по этой теме, в том числе проведена оценка результатов определения эффективности различных конструкций ВПП в наземных резервуарах. Для повышения эффективности ВПП предложено заменить болтовые соединения блочных ВПП сварными, повысить герметичность болтовых соединений и (или) сократить их протяженность, исключить плавающие опорные стойки внутренних ВПП, используя в качестве альтернативы систему подвески. Полученные в работе результаты позволят определить критерии и значения эффективности ВПП, обоснованно назначить технические требования к покрытиям. Это, в свою очередь, будет способствовать улучшению характеристик ВПП, снижению экологического ущерба и повышению безопасности эксплуатации резервуаров.

Буленуар А., Бенамара Н., Мерзуг М. Численное моделирование распространения трещины при смешанном режиме нагружения. — 2017. — № 4.

Представлено численное моделирование распространения трещин в режиме IScience & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation 9 CONTENT ISSN Print 2221-2701 2017 7(4):8–11 eISSN 2541-9595 и при смешанном режиме нагружения. Начальный критерий распространения трещины основан на коэффициенте интенсивности напряжения (КИН), наиболее важном параметре, который должен быть точно определен сингулярным элементом. Для получения КИН в вершине трещины и определения направления ее развития используется программный комплекс Ansys, а также прием экстраполяции смещения и максималь-

ного кольцевого напряжения. Результаты расчетов показали достаточно хорошее совпадение с численными и аналитическими результатами, полученными другими исследователями. Таким образом, делается вывод о том, что разработанный метод распространения трещин достаточно эффективен.

Газовая промышленность (научно-технический и производственный журнал)

Кирилов А.Э., Трефилов В.А. Разработка метода оценки безопасности персонала компрессорного цеха при эвакуации с использованием методов имитационного моделирования. — 2017. — № 6. — С. 106–110.

Представлен метод оценки безопасности персонала при эвакуации в случае пожара из помещения машинного зала газоперекачивающих агрегатов. В основу положена математическая модель, учитывающая случайный характер изменения времени эвакуации. Предполагается, что время эвакуации людей зависит от скорости движения по эвакуационным маршрутам, в число которых входят не только стандартные эвакуационные пути, но и участки, пролегающие внутри пространств технологических отсеков газоперекачивающих агрегатов: по вертикальным лестницам и другим участкам, движение по которым по различным причинам затруднено. Кроме того, считается, что на продолжительность эвакуации влияют особенности поведения людей, скорость формирования очаговых признаков пожара, инерционность систем оповещения и управления эвакуацией, продолжительность оперативных действий персонала. Введен показатель, по которому оценивается безопасность условий эвакуации по конкретному маршруту, учитывающий вышеуказанные факторы. Составлена формула вероятности эвакуации людей из машинного зала, учитывающая показатели безопасности маршрутов движения и надежности систем защиты. Предложено реализовать принцип оценки безопасности персонала при эвакуации в формате компьютерной программы с использованием методов имитационного моделирования.