

Моделирование гидроудара в разветвленных трубопроводных системах



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



М.В. Лисанов,
д-р техн. наук,
директор центра
анализа риска



А.А. Агапов,
канд. техн. наук, директор
по информационным
технологиям



А.С. Софьин,
канд. техн. наук,
зав. отделом



А.М. Сверчков,
мл. научный
сотрудник



А.Ф. Егоров,
д-р техн. наук, проф.,
зав. кафедрой

НИЯУ МИФИ

ЗАО НТЦ ПБ

РХТУ им.
Д.И. Менделеева

Рассмотрены задачи о моделировании гидроудара в разветвленной трубопроводной системе с использованием программного модуля TOXI+Гидроудар, разрабатываемого в составе программного комплекса TOXI+Risk и позволяющего проводить моделирование утечек из магистральных трубопроводов при различных аварийных ситуациях путем решения уравнений гидродинамики (CFD) с использованием метода С.К. Годунова.

The Article reviews the tasks on modeling of hydraulic impact in the branched piping system with the use of software module TOXI+Hydraulic impact developed in the scope of software complex TOXI+Risk and allowing for conducting of the modeling of leakages from the main pipelines at various emergency situations by solving equations of hydrodynamics (CFD) with the use of S.K. Godunov method.

Ключевые слова: разветвленная трубопроводная система, CFD, переходные процессы, метод С.К. Годунова, гидроудар.
Key words: branched piping system, CFD, transition processes, S.K. Godunov method, hydraulic impact.

В России уже около 20 лет интенсивно развивается направление в области промышленной безопасности, связанное с анализом риска объектов трубопроводного транспорта. За эти годы пройден огромный путь по разработке нормативно-методических материалов: от разработки концепции [1–3] и изложения основ анализа риска в приложении к трубопроводным системам [4] до создания конкретных документов Ростехнадзора [5, 6]. Результаты многолетней апробации разработанных подходов на ряде объектов трубопроводного транспорта представлены в целом ряде работ [7–13].

Как и при любом анализе риска, процедура проведения анализа риска трубопроводного транспорта состоит из двух частей: оценки частоты событий и оценки последствий. Следует отметить, что оценка последствий для объектов трубопроводного транспорта имеет существенную специфику. Она заключается в том, что необходим расчет скорости выброса опасного вещества из трубопровода, а это достаточно сложная задача, поскольку следует учитывать тот факт, что при выбросе из трубопровода в нем происходит циркуляция волн сжатия (разре-

жения) и эти волны в значительной степени определяют скорость выброса. Поэтому при расчете последствий от аварий на трубопроводах фактически необходимо решать задачу о движении опасного вещества в протяженном трубопроводе. Решение такой задачи представляет собой нетривиальную процедуру и, как правило, может быть выполнено с помощью прямого численного моделирования на основе решения системы дифференциальных уравнений, описывающих одномерное нестационарное движение слабосжимаемой жидкости. Именно поэтому становятся неоспоримыми важность и необходимость разработки математических моделей и процедур для решения сформулированной задачи.

Процессы движения среды в трубопроводе надо уметь описывать и для прогнозирования нагрузок на трубопровод при циркуляции в нем волн сжатия (разрежения). Одно из наиболее опасных явлений — гидроудар, т.е. остановка движения потока жидкости с последующим формированием и распространением по трубе волн сжатия.

Для решения задач описания аварийного истечения и гидроудара авторами разработана математиче-

ская модель и предложен численный метод решения [14]. В работе [14] приведен пример расчета гипотетической аварийной разгерметизации трубопровода. Эта же методология успешно применена и к расчету гидроудара [15, 16]. Работы [14–16] демонстрируют возможности прямого численного моделирования. Учитывая простоту реализации численных методов [14], можно уверенно говорить о большом потенциале данного подхода и высоком качестве получаемых решений. Последнее становится еще более очевидным, если сравнить результаты прямого численного моделирования с расчетами по упрощенным моделям, например по подходу, изложенному в [17]. Как показано в работе [16], упрощенный метод [17] совершенно искажает физическую картину гидроудара.

В ЗАО НТЦ ПБ на протяжении нескольких лет разрабатывают программный модуль ТОХИ+Гидроудар, реализующий метод численного решения задачи моделирования течения жидкости в трубопроводе — модифицированный метод конечных объемов, относящийся к подразделу механики сплошных сред — вычислительной гидродинамике (Computational fluid dynamics, CFD), а именно метод С.К. Годунова.

Успешное использование методов в случае простейших топологий трубопроводных систем (единичный линейный участок) порождает естественное желание распространить подход [14] на случай более сложной, ветвящейся, трубопроводной системы.

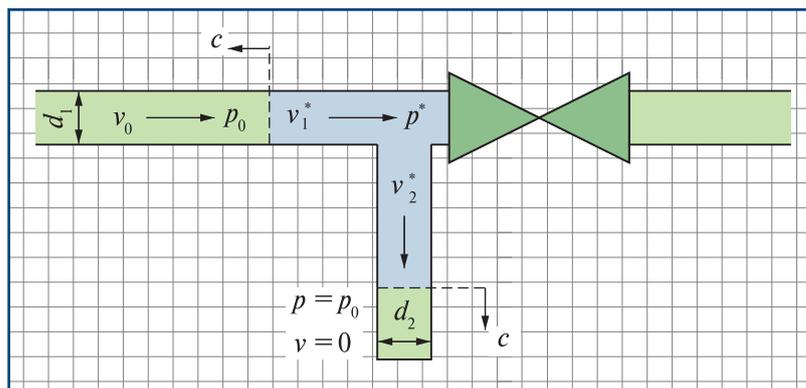
Постановка задачи о гидроударе в ветвящейся системе крайне актуальна с практической точки зрения. Действительно, моделирование гидроудара особенно важно в случаях быстрого срабатывания запорной арматуры. Такое быстрое (до 5 с) срабатывание запорной арматуры и полное перекрытие потока часто имеют место при отгрузке на морских терминалах, когда важно быстро отсечь поток, поскольку выброс может попасть в водную среду, что чревато огромным экологическим ущербом. Отгрузку больших объемов нередко проводят через несколько трубопроводов. Именно в такой ситуации и возможно возникновение гидроудара в разветвленной системе.

Тестовые расчеты и сравнение с точными решениями

Используемая в данной работе математическая модель и метод расчета гидроудара в разветвленных системах описаны в работе [14]. Единственное дополнительное условие, которым необходимо расширить модель, — это условие сохранения массы и импульса в подводящем потоке и потоках в ответвлениях.

При использовании любого численного метода возникает закономерный вопрос: какова точность

предлагаемого метода? Один из способов оценки качества решения того или иного численного метода — сравнение с аналитическими решениями. Для ветвящихся систем существует немного задач, которые имеют аналитические решения. Одна из них описана в работе [18], в которой представлено точное решение для течения вблизи разветвления, когда волна гидроудара выходит из трубы в развилку из двух труб, в одной из этих труб среда движется, а в другой покоится. Трение о стенки трубы в этом решении не учитывается. Схема этой задачи приведена на рис. 1 (при подготовке данного графического материала использована информация из статьи [19]).



▲ Рис. 1. Схема гидроудара в разветвленной системе:

v_1^* и v_2^* — скорость потока после встречи с задвижкой соответственно в основной трубе и в ответвлении; p — давление в ответвлении до закрытия задвижки; v — скорость потока в ответвлении до закрытия задвижки

Рассматривается течение в трубе со скоростью v_0 среды плотностью ρ_0 . Диаметр трубы d_1 , у трубы имеется ответвление диаметром d_2 . Среда в ответвлении покоится. В некоторый момент времени сразу за ответвлением срабатывает задвижка, мгновенно отсекающая поток. В результате поток на задвижке останавливается, а по основной трубе и по ответвлению распространяются две ударные волны.

После прохождения волной разветвления она делится на две волны, расходящиеся в две трубы [18, 19]. Скачок давления в основной трубе и в ответвляющемся трубопроводе Δp , возникающий при такой постановке задачи, описывается следующим соотношением для возрастания давления в этих волнах:

$$\Delta p = p^* - p_0 = \rho_0 v_0 c \frac{d_1^2}{d_1^2 + d_2^2}, \quad (1)$$

где p_0, p^* — давление в трубе соответственно до и после срабатывания задвижки; c — скорость распространения возмущений.

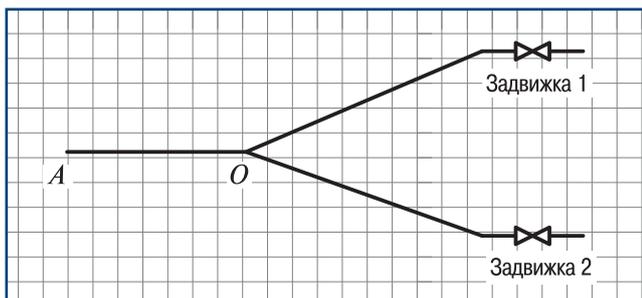
Численные расчеты, проведенные по методике [14] с использованием программы ТОХИ+Гидроудар, представлены в таблице. Расчеты выполнены при $\rho_0 = 840 \text{ кг/м}^3$ и $c = 1300 \text{ м/с}$.

v_0 , м/с	d_1 , м	d_2 , м	Δp , кПа		Ошибка, %
			расчетное	точное	
0,245	1	0,707	181,211	178,360	1,59
0,500	1	1,000	271,908	273,000	0,40
1,000	1	1,414	359,700	364,000	1,19

Как видно из таблицы, ошибка расчета составляет не более 2 %, что можно считать достаточно невысокой погрешностью. Отклонения от точного решения, которые наблюдаются в численном расчете, скорее всего обусловлены некоторыми отклонениями в постановке задачи при численном решении, в частности наличием небольшого участка между местом ветвления и задвижкой (ограничение модели); в аналитическом решении предполагалось отсутствие такого участка.

Расчеты гидроудара: срабатывание одной задвижки

Рассмотрим следующую модельную конфигурацию ветвящегося трубопровода (рис. 2). От начала трубопровода (точка А) до ветвления (точка О) труба протяженностью 20 км имеет диаметр 1 м, в точке О трубопровод ветвится на две одинаковые трубы длиной 20 км и диаметром 0,707 м каждая, т.е. площадь поперечных сечений двух ответвлений равна площади поперечного сечения главной трубы. Все трубы имеют одинаковую шероховатость 0,3 мм и проложены горизонтально. В начале трубы поддерживается давление 1 МПа, в конце труб-ответвлений — 0,3 МПа, а также стоят шибберные задвижки, которые полностью перекрывают поток за 10 с.

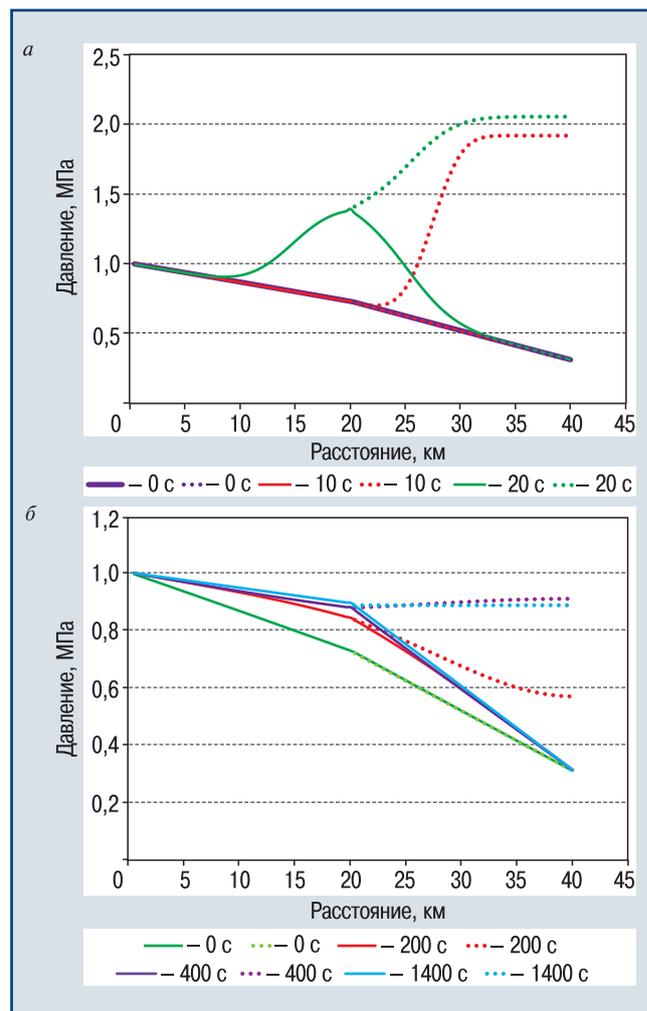


▲ Рис. 2. Схема модельной ветвящейся трубопроводной системы

Сценарий срабатывания задвижек следующий: сначала срабатывает задвижка 2, а потом, через некоторое время, — задвижка 1. При расчетах отсчет времени идет от момента начала закрытия задвижки 2. Предполагали, что скорость распространения возмущений составляет 1300 м/с.

На рис. 3 показаны профили давления в различные моменты времени для случая, когда срабатывает только задвижка 2 (время срабатывания задвижки 1 отнесено в бесконечность); основной трубе соответствует участок от начала трубопровода (точка А) до задвижки 1, ответвлению — участок от точки О до задвижки 2 (см. рис. 2).

Из рис. 3, а хорошо видно, как сформировавшаяся в ответвлении волна (красные линии) выходит в основной трубопровод (зеленые линии), а из рис. 3, б — как после завершения циркуляций волн в системе происходит постепенный рост давления по всем участкам трубопровода. Наиболее существенно давление повышается на участке от точки О до задвижки 2, там где поток полностью останавливается. В другом же ответвлении (от точки О до задвижки 1) и в основном трубопроводе (от начала трубопровода до точки О) рост давления по относительной величине менее значителен.



▲ Рис. 3. Профили давления в трубопроводе в моменты времени 10, 20 с (а) и 200, 400, 1400 с (б) после срабатывания задвижки 2 в конце ответвления (сплошная линия — основная труба, пунктирная — ответвление)

Расчеты гидроудара: срабатывание двух задвижек

Выше был рассмотрен вариант срабатывания только одной задвижки. Очевидно, что срабатывание двух задвижек может привести к более существенному повышению давления в трубопроводной системе, поскольку волна сжатия от второй задвижки будет распространяться по среде, где уже про-

изошел рост давления в результате срабатывания первой задвижки.

Срабатывание задвижек может происходить одновременно или с некоторой асинхронностью. В связи с этим возникает вопрос, какой из вариантов срабатывания задвижек будет наиболее опасным с точки зрения возникновения максимального давления. Для ответа на него были проведены расчеты с различными вариантами срабатывания задвижек. Общая схема перекрытия потока выглядела следующим образом. Сначала срабатывала задвижка на основном участке, а затем, с некоторой задержкой, задвижка на ответвлении. Результаты расчетов в виде распределения максимально достигаемого давления по основной трубе и в ответвлении представлены на рис. 4. На рис. 4, а приведены профили максимального давления для случаев срабатывания второй задвижки с задержкой в 1; 2,5 и 5 с; на рис. 4, б — 10; 15; 20; 25 и 30 с; на рис. 4, в — 35; 40; 45 и 50 с; на рис. 4, г — 60; 70; 90 и 110 с; на рис. 4, д — 240 и 600 с. На каждом из этих рисунков приведены и профили максимального давления, достигаемого в трубопроводной системе при срабатывании только одной задвижки (линии красного цвета) и при одновременном срабатывании сразу двух задвижек (линии лилового цвета).

Из рис. 4, а видно, что при малом времени задержки срабатывания задвижки на ответвлении профили давления близки к профилям в случае одновременного срабатывания задвижек. При этом при 1-секундной задержке отклонения наблюдаются лишь в зоне ветвления. Сами отклонения невелики: в основной трубе давление уменьшается, а в ответвлении нарастает. По мере увеличения временной задержки разница в значениях давления становится все более заметной, причем рост давления в ответвлении более существенен, чем падение давления в основной трубе. Так, при 5-секундной задержке (линии оранжевого цвета) падение давления в основной трубе составляет около 0,15 МПа (сплошная оранжевая линия в сравнении со сплошной лиловой линией), в то время как рост давления в ответвлении составляет более 0,5 МПа (пунктирная оранжевая линия в сравнении с пунктирной лиловой линией). Также при росте временной асинхронизации наблюдается снижение максимально достигаемого давления в начале трубопровода.

При росте временной задержки отмеченные тенденции сохраняются и для временной разницы в срабатывании задвижек 10–30 с. Как видно из рис. 4, б, максимально достигаемое давление в основной трубе продолжает уменьшаться, стремясь к давлению, наблюдаемому в случае срабатывания только одной задвижки (сплошная черная линия сближается со сплошной красной линией). В то же время давление в ответвлении существенно растет: при 30-секундной задержке максимальное давление (синяя пунктирная линия) превышает давление

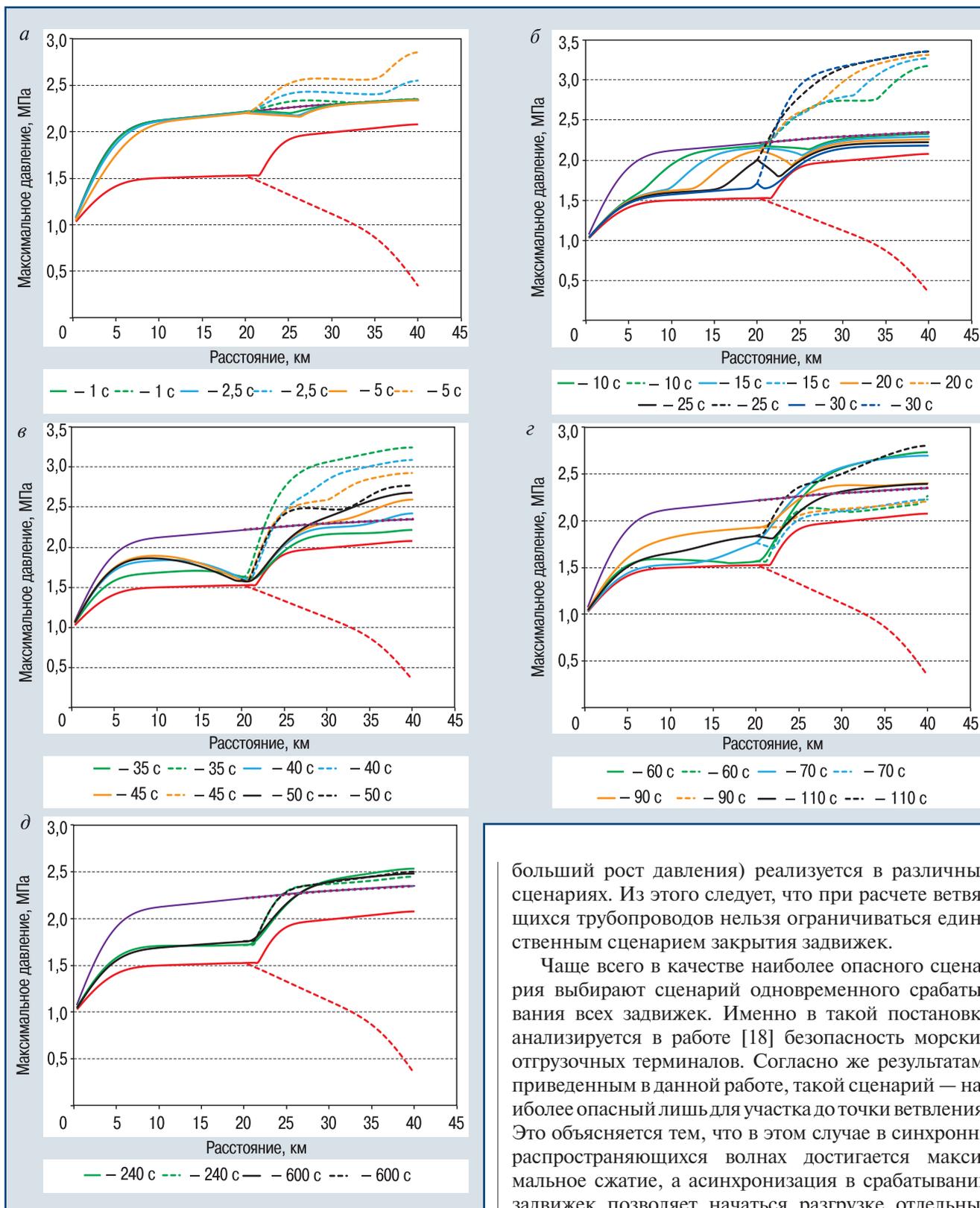
для случая одновременного срабатывания задвижек (лиловые линии) почти на 1 МПа.

При 30-секундной задержке срабатывания второй задвижки, как видно из рис. 4, б, максимально достигаемое давление в основной трубе находится на минимальном значении, а в ответвлении — на максимальном. Это объясняется тем, что за 30 с с небольшим волна сжатия, сгенерированная при закрытии первой задвижки, успевает, с одной стороны, достигнуть начала трубопровода и начать разгружать трубу основного участка до точки ветвления, а с другой стороны, достигнуть второй задвижки (на ответвлении), тем самым сжав среду на этом участке-ответвлении до наибольших значений. В результате вторая волна сжатия, сгенерированная при срабатывании второй задвижки, будет распространяться по максимально сжатой среде в ответвлении и по максимально разгруженной среде на основном участке.

При дальнейшем увеличении временной асинхронизации максимально достигаемое давление на основном участке начинает расти, а в ответвлении наоборот — падать. Это обусловлено тем, что теперь первая волна сжатия проходит через ответвление и в нем начинается разгрузка, соответственно в ответвлении вторая волна сжатия распространяется по менее сжатой среде. В силу этого фактора примерно с 50–55-й с максимально достигаемое давление на основном участке после точки ветвления начинает превосходить максимальное давление в ответвлении (черные линии на рис. 4, в) и зеленые линии на рис. 4, г).

При задержке срабатывания второй задвижки более 50 с (см. рис. 4, г) максимально достигаемое давление на основном участке до точки ветвления сначала падает (зеленые линии), потом несколько увеличивается (оранжевые линии) и снова падает (черные линии) (см. рис. 4, г). В конце концов, начиная с некоторой временной задержки, максимально достигаемое давление приходит к значению, на которое уже не влияет дальнейшее увеличение времени задержки до срабатывания второй задвижки. Аналогичные колебания и выход на неизменное в дальнейшем значение максимально достигаемого давления наблюдается и для участков после точки ветвления (см. рис. 4, г, д).

Максимально достигаемое давление, соответствующее ситуации, когда оно уже не изменяется с увеличением временной разницы срабатывания задвижек, представлено на рис. 4, д на примере с задержкой в 240 и 600 с. При этом при больших задержках в срабатывании второй задвижки максимально достигаемое давление до точки ветвления несколько превосходит соответствующую величину для случая срабатывания только одной задвижки, а максимальное давление, достигаемое на участках после точки ветвления, несколько превосходит давление для случая одновременного срабатывания задвижек.



▲ Рис. 4. Максимально достигаемое давление в основной трубе (сплошная линия) и в ответвлении (пунктирная линия) при срабатывании двух задвижек

Если проанализировать полученные результаты, то можно сделать следующий вывод: для разных участков трубы наибольшая опасность (т.е. наи-

большой рост давления) реализуется в различных сценариях. Из этого следует, что при расчете ветвящихся трубопроводов нельзя ограничиваться единственным сценарием закрытия задвижек.

Чаще всего в качестве наиболее опасного сценария выбирают сценарий одновременного срабатывания всех задвижек. Именно в такой постановке анализируется в работе [18] безопасность морских отгрузочных терминалов. Согласно же результатам, приведенным в данной работе, такой сценарий — наиболее опасный лишь для участка до точки ветвления. Это объясняется тем, что в этом случае в синхронно распространяющихся волнах достигается максимальное сжатие, а асинхронизация в срабатывании задвижек позволяет начаться разгрузке отдельных участков и, соответственно, происходит уменьшение максимально достигаемого давления. Для участков, находящихся за точкой ветвления (по направлению течения жидкости), ситуация с одновременным закрытием двух задвижек — наилучший вариант, так как в этом случае на протяжении всех участков получаются наименьшие значения максимально дости-

гаемого давления. Во всех остальных случаях, и это хорошо видно из рис. 4, среди участков, находящихся за точкой ветвления, всегда существует участок, где достигается давление большее (и порой весьма существенно), нежели максимальное давление при одновременном срабатывании задвижек.

Понятно, что в случае варьирования диаметра и длины трубопровода может возникать спектр еще более разнообразных ситуаций. В связи с этим следует сделать важный вывод: анализ нагрузок на ветвящийся трубопровод при возникновении явления гидроудара нужно проводить во всем спектре возможных сценариев закрытия задвижек.

Заключение

В работе предложено использовать метод С.К. Годунова для расчета гидроудара в разветвленных трубопроводных системах. Успешно продемонстрирована возможность распространения этого метода на разветвленные трубопроводные системы. На примере имеющей аналитическое решение задачи о гидроударе в разветвлении трубопроводов показана высокая точность используемого численного метода.

Решена задача о гидроударе при различных вариантах срабатывания задвижек для модельной системы с одним ответвлением и задвижками на концах трубопроводной системы. В различных работах, например в [18], показано, что одновременное закрытие задвижек приводит к максимальным нагрузкам на основной трубопровод (от начала до точки ветвления). Но в трубопроводах после точки ветвления максимальные нагрузки на трубопровод при гидроударе возникают не при одновременном срабатывании отсекающих задвижек на концах трубопровода, а при некоторой задержке в срабатывании задвижек на концах. Следует отметить, что даже небольшая асинхронизация в срабатывании задвижек может привести к существенному росту давления в ответвлениях по сравнению со случаем одновременного срабатывания задвижек. Причем в рассмотренной системе одновременное срабатывание задвижек дает наименьший рост давления в ответвлениях по сравнению с любым асинхронным вариантом закрытия задвижек.

Исходя из этого, можно сделать важный методологический вывод: при анализе ветвящихся систем для определения максимального давления на участках ветвлений необходимо рассматривать спектр событий, связанных с различными вариантами закрытия задвижек.

Список литературы

1. *Перспективы нормативного обеспечения анализа риска магистральных нефтепроводов*/ М.В. Лисанов, В.Ф. Мартынюк, А.С. Печеркин и др.// Трубопроводный транспорт нефти. — 1996. — № 8. — С. 8–10.
2. *Концепция методического руководства по оценке степени риска магистральных трубопроводов*/ Ю.В. Ли-

син, А.Ю. Верушин, М.В. Лисанов и др.// Трубопроводный транспорт нефти. — 1997. — № 12. — С. 8–14.

3. *Декларирование промышленной безопасности объектов магистрального трубопроводного транспорта газа и опасных жидкостей*/ Ю.А. Дадонов, С.Н. Мокроусов, М.В. Лисанов и др.// Безопасность труда в промышленности. — 1998. — № 5. — С. 54–57.

4. *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.

5. *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.

6. *Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов*: рук. по безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 7 нояб. 2014 г. № 500. — Сер. 08. — Вып. 24. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. — 118 с.

7. *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.

8. *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.

9. *Оценка риска аварий на магистральном аммиакопроводе «Тольятти — Одесса»*/ Ю.А. Дадонов, Д.В. Дегтярев, И.А. Кручинина и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2003. — № 10. — С. 27–30.

10. *Анализ риска аварий на нефтепроводных системах БТС и МН «Дружба»*/ М.В. Лисанов, А.И. Гражданкин, А.В. Пчельников и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2006. — № 1. — С. 34–40.

11. *Анализ риска аварий на магистральном трубопроводе, транспортирующем широкую фракцию легких углеводородов*/ С.И. Сумской, А.В. Пчельников, Е.Л. Шанина и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2007. — № 2. — С. 48–52.

12. *Анализ риска магистральных нефтепроводов при обосновании проектных решений, компенсирующих отступления от действующих требований безопасности*/ М.В. Лисанов, С.И. Сумской, А.В. Савина и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2010. — № 3. — С. 58–66.

13. *Савина А.В., Сумской С.И., Лисанов М.В. Анализ риска аварий на магистральных трубопроводах при обосновании минимальных безопасных расстояний*// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 3. — С. 58–63.

14. *Моделирование переходных и аварийных процессов в магистральных нефтепроводах с помощью метода С.К. Годунова*/ С.А. Губин, Т.В. Губина, С.И. Сумской, М.В. Лисанов// Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 10. — С. 66–71.

15. *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.

16. *О критических замечаниях* по статье «Моделирование аварийных утечек на магистральных нефтепроводах»/ С.И. Сумской, А.А. Агапов, А.С. Софьин и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 7. — С. 66–71.

17. *Антипьев В.Н., Налобина Е.В., Налобин И.Н.* Рецензия на статью «Моделирование аварийных утечек на магистральных нефтепроводах»// Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 7. — С. 61–65.

18. *Арбузов Н.С.* Обеспечение технологической безопасности гидравлической системы морских нефтеналивных терминалов в процессе налива судов у причальных сооружений: дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2014. — 308 с.

19. *Арбузов Н.С., Дидковская А.С., Лурье М.В.* Защита трубопроводов морских нефтеналивных терминалов от гидравлического удара с помощью береговой компенсаторной емкости// Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2012. — № 4. — С. 33–35.

inform@safety.ru

Материал поступил в редакцию 12 октября 2015 г.

ЭЛЕКТРОННАЯ ПОДПИСКА на 2016 г.

Журнал «Безопасность труда в промышленности»	7440 руб.
Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору	1500 руб.

-25 % стоимости печатного издания!



Внимание рекламодателей!

Размещение информации о деятельности вашей компании на страницах журнала «Безопасность труда в промышленности» — это эффективный способ привлечения внимания целевой аудитории.

Приобрести электронные издания и получить консультацию можно в отделе распространения, отправив заявку по электронной почте ornd@safety.ru, по тел./факсу (495) 620-47-53, или в интернет-магазине www.shop.safety.ru.

105082, Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14, а/я 38

Отдел рекламы

(495) 620-47-54.

E-mail: ignatova@safety.ru

Реклама

ИЩЕТЕ НАДЕЖНЫЙ ИНСТРУМЕНТ КОНТРОЛЯ?

ДЕФЕКТОСКОП PELENG



ДВА В ОДНОМ:
УЛЬТРАЗВУК
И ВИХРЕТОК

(812) 336-8888
www.altek.info
altek@altek.info



АЛТЕК®
НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ГРУППА