

# Учет кавитационных явлений при моделировании течений в магистральных трубопроводах



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



**С.И. Сумской,**  
канд. техн. наук, вед. науч.  
сотрудник

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия

НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Для решения задачи о гидроударе, в том числе в приложении к расчету интенсивности выброса транспортируемого вещества в результате аварийных ситуаций на трубопроводах, необходимы соответствующие математические модели и численные методы. При моделировании в математической модели необходимо учитывать возможное вскипание транспортируемой по протяженному трубопроводу жидкости. Для решения такой задачи в данной работе предложено использовать численный метод на основе подхода С.К. Годунова.

**Ключевые слова:** переходные процессы, метод С.К. Годунова, гидроудар, трубопроводный транспорт, разгерметизация трубопровода, кавитация, ТОХ1+Гидроудар.

**Для цитирования:** Сверчков А.М., Сумской С.И. Учет кавитационных явлений при моделировании течений в магистральных трубопроводах// Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 11. — С. 7–14. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-11-7-14

## Введение

Оценка последствий аварий на объектах трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов имеет существенную специфику [1, 2]. Она состоит в том, что расчет интенсивности выброса опасного вещества из трубопровода — достаточно сложная задача, при решении которой необходимо учитывать ряд особенностей и различных факторов. В данной статье рассматривается учет возможного вскипания транспортируемой по трубопроводу жидкой среды, что является развитием модели, изложенной ранее в [3].

Решение такой задачи — нетривиальная процедура и, как правило, может быть выполнено с помощью прямого численного моделирования на основе решения системы дифференциальных уравнений,

описывающих одномерное нестационарное движение слабосжимаемой жидкости, способной частично переходить в пар.

Для решения задач описания аварийного истечения ранее в [3, 4] была разработана математическая модель и предложен численный метод на основе подхода С.К. Годунова [5] для ее реализации. Эта методология была успешно применена и к расчету гидроудара [6]. Модели и результаты, представленные в публикациях [3, 4, 6] верифицированы по экспериментам [7–10].

В данной работе продемонстрирована возможность учета кавитации в рамках подхода, предложенного ранее в [3, 4, 6]. Показано, что картина нагружения трубопровода при учете возможного вскипания жидкости будет отличаться от картины, получаемой при моделировании без учета возможного вскипания жидкости. Причем давление в трубопроводе в случае вскипания жидкости может заметно повыситься, что в свою очередь может спровоцировать аварийную ситуацию, сопровождающуюся разрушением трубопровода и неконтролируемым выбросом из него транспортируемой среды.

## Изотермическое приближение расчета кавитационных процессов

При аварии на трубопроводах могут возникать ситуации, когда нарушается сплошность среды и в жидкости появляется паровая фаза, что обусловлено, в частности, стремлением системы к равновесному состоянию «пар — жидкость».

В данной работе транспортируемый продукт рассматривается состоящим из двух составляющих: из жидкой фазы (ж) и паровой фазы этой жидкости (п), т.е. в каждой точке пространства будет существовать в общем случае смесь этих двух компонент. Объемная доля каждого компонента будет составлять  $\varphi_{ж}$  и  $\varphi_{п}$ , соответственно для жидкости и пара. В предположении равномерного смешения жидкости и пара систему можно характеризовать средней плотностью этой смеси  $\rho_{см}$ :

$$\rho_{см} = \varphi_{ж}\rho_{ж} + \varphi_{п}\rho_{п}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{ж} + \varphi_{п} = 1$ ;  $\rho_{ж}$ ,  $\rho_{п}$  — индивидуальная плотность соответственно жидкости и пара.

Помимо объемной доли  $\varphi_i$  состав смеси может задаваться массовой долей  $Y_i$ .

$$Y_{i,см} = \varphi_i\rho_i. \quad (2)$$

Уравнения движения в одномерном равновесном приближении выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{см}}A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{см}}uA)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_{\text{см}}uA)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{см}}u^2A)}{\partial x} = \\ = -A \frac{\partial p}{\partial x} - Ag\rho \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\pi}{4} \lambda \rho u |u| r; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_{\text{п}}\varphi_{\text{п}}A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{п}}\varphi_{\text{п}}uA)}{\partial x} = S_{\text{п}}, \quad (5)$$

где  $A$  — площадь внутреннего поперечного сечения трубы;  $t$  — время;  $u$  — скорость движения парожидкостной смеси;  $x$  — координата вдоль оси трубопровода;  $p$  — давление;  $z$  — высотная отметка трубопровода;  $\lambda$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  $r$  — внутренний радиус трубопровода;  $S_{\text{п}}$  — скорость изменения массы паров.

Выписанная система уравнений (3)–(5) несколько отличается от уравнений в [3, 4, 6]. С одной стороны, в этой системе присутствует допущение о двухфазности, а с другой стороны, рассматривается механическое и скоростное равновесие фаз, не учитывается взаимодействие пузырьков с турбулентной жидкой фазой, предполагается изотермичность потока. Это обусловлено допущениями о невысокой разнице в скоростях жидкой и паровой фаз (образующиеся в движущейся жидкости пузырьки уже имеют скорость жидкой фазы), малым объемом испаряющейся в замкнутом объеме трубопровода жидкости и сравнительно крупным размером пузырьков (что препятствует их турбулентной диффузии). Также предполагается, что система уравнений (3)–(5) описывает гомогенный поток, в том смысле, что пузырьки более или менее равномерно распределены по сечению трубы, что справедливо при непродолжительном времени существования гетерогенного потока.

Еще одной величиной, для которой необходимо задать способ замыкания, является скорость появления (исчезновения) паров жидкой фазы  $S_{\text{п}}$ . Эта величина стоит в правой части уравнения (5).

В данной работе предлагается использовать допущение о мгновенном установлении равновесия между жидкой и паровой фазами. Это означает, что, с одной стороны, давление в жидкой фазе не может быть ниже давления насыщенных паров, а, с другой стороны, и давление в паре не может быть выше давления насыщенного пара, т.е. парожидкостная смесь всегда находится при давлении насыщенных паров.

Для расчета давления насыщенных паров  $p_{\text{п}}$  при температуре  $T$  предлагается использовать уравнение Менделеева — Клапейрона в виде:

$$p_{\text{п}} = p_0 \exp \left[ \Delta H_{\text{кип}} \mu \left( \frac{1}{T_{\text{кип}}} - \frac{1}{T} \right) / R \right], \quad (6)$$

где  $\Delta H_{\text{кип}}$  — теплота кипения;  $\mu$  — молярная масса вещества;  $T_{\text{кип}}$  — температура кипения при давлении  $p_0$ ;  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Для давления  $p_{\text{п}}$  по соответствующим уравнениям состояния могут быть рассчитаны плотности пара и жидкости на линии насыщения  $\rho_{\text{ж}}(p_{\text{п}})$  и  $\rho_{\text{п}}(p_{\text{п}})$ .

Соответственно одновременное существование пара и жидкости возможно при  $\rho_{\text{см}} < \rho_{\text{ж}}(p_{\text{п}})$ . В этом случае:

$$\varphi_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{см}} - \rho_{\text{ж}}(p_{\text{п}})}{\rho_{\text{п}}(p_{\text{п}}) - \rho_{\text{ж}}(p_{\text{п}})}. \quad (7)$$

Для описания течения необходимо знать еще несколько характеристик парожидкостной смеси. Они используются в вычислительных процедурах.

Ниже приводятся способы их расчета.

Скорость звука в парожидкостной смеси  $c_{\text{см}}$ , находящейся при давлении  $p$  и температуре  $T$  с объемной долей пара  $\varphi_{\text{п}}$ , рассчитываются следующим образом:

$$c_{\text{см}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{см}} c_{\text{в см}} c_{(\varphi, p)}^2 + \frac{p^2}{T}}{\rho_{\text{см}}^2 c_{\text{в см}}}}; \quad (8)$$

$$\frac{1}{c_{(\varphi, p)}^2} = \frac{\varphi_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} c_{\text{п}}^2} + \frac{1 - \varphi_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}} c_{\text{ж}}^2}, \quad (9)$$

где  $c_{\text{п}}$ ,  $c_{\text{ж}}$  — скорость звука соответственно в паровой среде и в жидкости;  $c_{\text{в см}}$  — теплоемкость смеси, определяемая через теплоемкости пара  $c_{\text{в п}}$  и жидкости  $c_{\text{в ж}}$  следующим образом:

$$c_{\text{в см}} = \varphi_{\text{п}} c_{\text{в п}} + (1 - \varphi_{\text{п}}) c_{\text{в ж}}. \quad (10)$$

Таким образом, движение вскипающей жидкости в упругой деформируемой среде в рамках сделанных предположений полностью описывается приведенными выше уравнениями.

Для полной корректности постановки задачи требуется также задание начальных и граничных данных. В данной работе используются те же типы граничных условий, что и в [3, 4, 6].

Для решения выписанной системы уравнений используется тот же численный метод на основе подхода С.К. Годунова [5], что и в [3, 4, 6], с поправкой на использование в решении задачи Римана в акустическом приближении скоростей звука для парожидкостной смеси в виде (8).

### Постановка задачи

Рассмотрим задачу о возникновении гидроудара с учетом кавитационных процессов в трубопроводе, проложенном по рельефу местности с большим перепадом высот. Как известно, кавитационные процессы могут возникать при падении давления жидкости ниже давления насыщенных паров. В этом случае происходит нарушение равновесия в системе «пар — жидкость» и, в результате стрем-

ления системы снова прийти в равновесие, часть жидкости будет переходить в паровую составляющую, устанавливая давление на уровне давления насыщения.

Кавитация реализуется в условиях, когда существует поток от жесткой стенки (или, в более общем варианте — при «растягивающем» градиенте скорости). Такой поток возникает либо сразу за быстро закрытой задвижкой, либо перед ней, после того как к ней вернется волна разгрузки от начала трубопровода. Последняя ситуация сопровождается во времени появлением перед кавитацией гидроудара — скачка давления сразу после закрытия задвижки, такая ситуация наблюдалась в варианте течения в верификации модели по эксперименту [7].

Рассмотрим течение, возникающее на максимальном имитирующем реальный объект трубопроводе. Отличительной особенностью этого трубопровода является установленная в его конце быстро отсекающая поток задвижка. Время полного перекрытия потока — 5 с, что соответствует реальным современным задвижкам, устанавливаемым на стеллажи отгрузочных терминалов.

Высотный профиль трубопровода представлен на рис. 1.



▲ Рис. 1. Высотный профиль трубопровода  
▲ Fig. 1. Altitude profile of the pipeline

Длина трубопровода составляет 917 м, внутренний диаметр 0,996 м, толщина стенки — 0,012 м, шероховатость внутренних стенок постоянна и равна 0,2 мм. Давление в начале трубопровода 1 атм., в конце трубопровода — 6 атм.

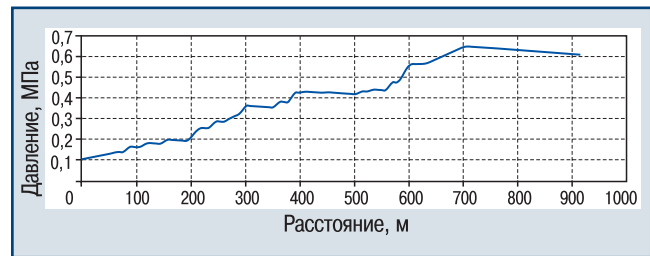
По трубопроводу транспортируется нефть со следующими свойствами: плотность — 860 кг/м<sup>3</sup>, вязкость — 0,0213 Па·с, скорость звука в жидкой фазе — 1320 м/с, скорость звука в ГФ — 300 м/с, теплоемкость жидкости — 2090 Дж/(кг·К), теплоемкость пара — 1230 Дж/(кг·К), теплота испарения — 292 кДж/кг, температура кипения — 333 К, давление насыщенных паров при температуре 298 К — 6 кПа.

Профиль давления в стационарном режиме работы трубопровода представлен на рис. 2.

Рассматривается течение, возникающее после срабатывания быстродействующей задвижки, расположенной в конце трубопровода.

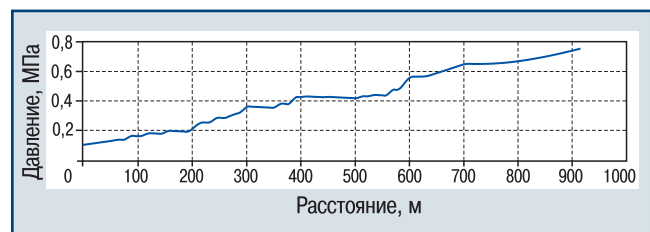
#### Развитие гидроудара с учетом кавитации

Ниже, на рис. 3–11 представлены распределения давления в различные моменты времени.

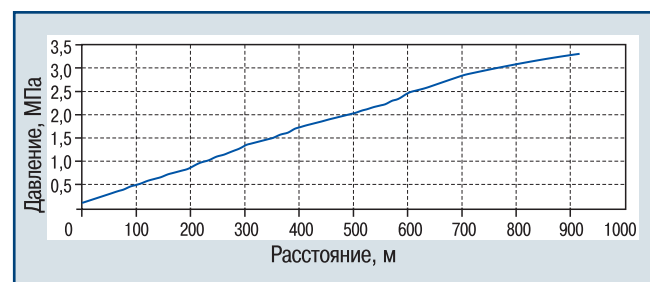


▲ Рис. 2. Профиль давления в штатном режиме работы трубопровода  
▲ Fig. 2. Pressure profile in the normal operation mode of the pipeline

На рис. 3 представлено начало процесса гидроудара. Из этого рисунка хорошо видно, как у закрывающейся задвижки формируется волна сжатия. На рис. 4 показано распределение давления на момент времени, когда в конце у задвижки достигается максимальное давление.

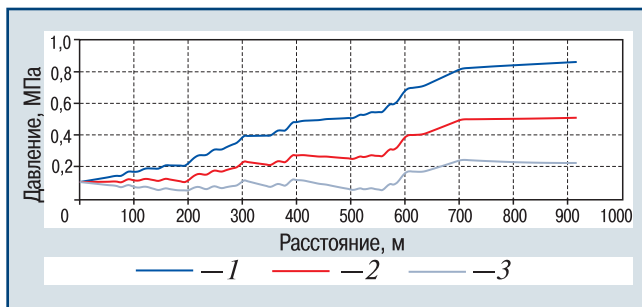


▲ Рис. 3. Профиль давления через 0,15 с после начала закрытия задвижки  
▲ Fig. 3. Pressure profile in 0.15 s after the start of valve closing



▲ Рис. 4. Профиль давления через 1,546 с после начала закрытия задвижки (пик гидроудара)  
▲ Fig. 4. Pressure profile in 1.546 s after the start of valve closing (fluid hammer peak)

На рис. 5 приведены профили давления на моменты времени 2,546; 2,65 и 2,736 с после начала закрытия задвижки. Из этого рисунка видно, что в трубопроводе начинается падение давления. Эта разгрузка вызвана тем, что волна сжатия, подойдя к началу трубопровода, начинает разгружаться у него. В результате разгрузки нефть движется от задвижки, что и дает постепенный спад давления (см. рис. 5). При такой разгрузке на разных участках объемы нефти в силу наличия рельефа и различных градиентов скорости разгружаются с различными скоростями. В результате на отдельных участках разгрузка может приводить к столь значительному уменьшению плот-



▲ Рис. 5. Профиль давления через 2,546 с (линия 1); 2,65 с (линия 2) и 2,736 с (линия 3) после начала закрытия задвижки (первый участок со вскипающей жидкостью)  
 ▲ Fig. 5. Pressure profile in 2.546 s (line 1); 2.65 s (line 2) and 2.736 s (line 3) after the start of valve closing (first section with boiling liquid)

ности, что нефть начинает вскипать. Здесь падение давления и появление первого участка, где происходит вскипание нефти, можно увидеть в районе 200 м от начала трубопровода. В этой зоне давление находится на уровне давления насыщенных паров. В дальнейшем парожидкостные зоны течения появляются и на других участках.

На рис. 6 представлен профиль давления на момент 2,78 с, когда наблюдается появление нескольких зон, где присутствует вскипающая жидкость (в этих зонах давление держится на уровне давления насыщенных паров), при этом в конце трубопровода по-прежнему наблюдается только жидкость. К моменту же времени 2,841 с в конце трубопровода уже хорошо видно наличие вскипевшей жидкости. В то же время на участках в окрестности отметок 300 и 400 м наблюдается рост давления, паровая фаза в этом месте отсутствует. Можно отметить, что эти пики давления образуются в местах скачков высотного профиля трубопровода, там, где скорости «сближаются» различные слои потока быстрее, чем в других местах.



▲ Рис. 6. Профиль давления через 2,78 с (линия 1); 2,841 с (линия 2) и 3 с (линия 3) после начала закрытия задвижки  
 ▲ Fig. 6. Pressure profile in 2.78 s (line 1); 2.841 s (line 2) and 3 s (line 3) after the start of valve closing

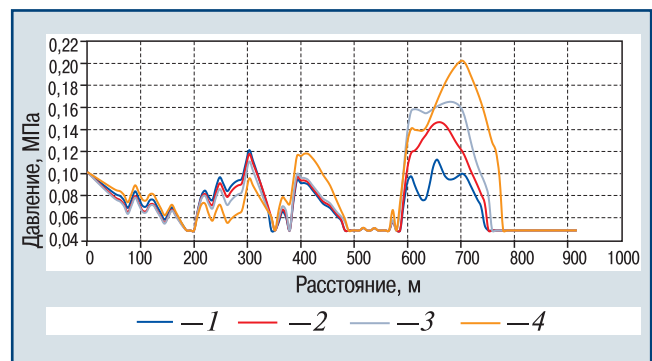
К моменту времени 3 с после начала закрытия задвижки на участке 400–500 м наблюдается движение

границы раздела жидкостной и гетерогенной зон течения в правую сторону (2,78 с, далее 2,841 с и 3 с). В то же время в окрестности отметки 700 м появилась зона, содержащая только жидкость. Видно, что на участке с 200 по 350 м зоны с наличием паровой фазы совсем исчезли и наблюдается объединенный пик по давлению. На расстоянии 650 м наблюдается участок с наличием паровой фазы, который постепенно уменьшается, стремясь образовать общий с соседними участками (два пика давления справа и слева) объем только жидкой фазы.

Следует отметить, что моделируемое течение обусловлено действием градиентов давления на движущиеся объемы (столбы жидкости). В образовавшемся потоке участки с парожидкостной смесью и с чистой жидкостью чередуются. Причем рост плотности в парожидкостном объеме (при его схлопывании) до определенной поры (до исчезновения паровой фазы) не ведет к росту давления в парожидкостном объеме. В результате движущиеся навстречу друг другу столбы жидкости, разделенные парожидкостной прослойкой, не вызывают сильных изменений давления. Однако со временем движение жидкости приводит к схлопыванию участков с наличием пара и столкновению этих противоположно движущихся столбов жидкости, что приводит к образованию локальных зон сплошного потока сталкивающихся столбов жидкости, и как следствие, наблюдается рост пиков давления в зонах схлопывания кавитационных зон.

Фактически имеет место гидроудар, но не при торможении потока на закрывшейся задвижке, а при торможении двух сталкивающихся жидкостных потоков после схлопывания разделявшей их парожидкостной подушки.

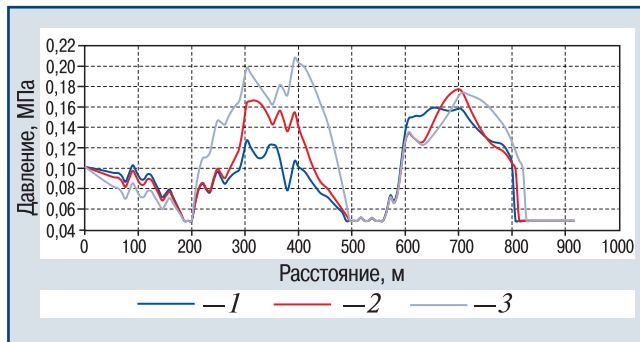
Результат такого взаимодействия на отметке 650 м визуализируется на рис. 6, 7 в сближении двух пиков по давлению при схлопывании парожидкостной подушки (участок с наличием паровой фазы), их объединении после исчезновения парожидкостной подушки и взаимном усилении с формированием зоны быстрорастущего давления.



▲ Рис. 7. Профиль давления через 3,029 с (линия 1); 3,05 с (линия 2); 3,07 с (линия 3) и 3,133 с (линия 4) после начала закрытия задвижки  
 ▲ Fig. 7. Pressure profile in 3.029 s (line 1); 3.05 s (line 2); 3.07 s (line 3) and 3.133 s (line 4) after the start of valve closing

На рис. 7 видно, как идет скачкообразный рост по давлению в окрестности 650 м от 3,029 с. В этот же момент наблюдается аналогичная картина и в районе отметки 350 м, где сталкиваются жидкостные объемы, находящиеся в окрестностях 300 и 400 м.

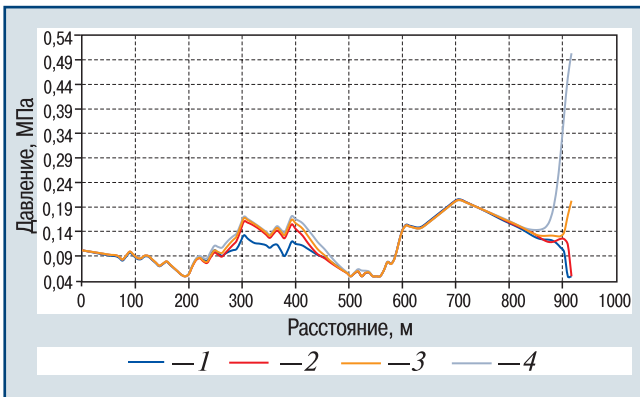
Картина течения (по схеме, аналогичной описанной выше) в окрестности 350 м представлена на рис. 8.



▲ Рис. 8. Профиль давления через 3,238 с (линия 1); 3,2672 с (линия 2) и 3,3299 с (линия 3) после начала закрытия задвижки

▲ Fig. 8. Pressure profile in 3.238 s (line 1); 3.2672 s (line 2) and 3.3299 s (line 3) after the start of valve closing

Наличие парожидкостных объемов замедляет распространение волн давления. Это видно, например, по движению волны давления к задвижке (рис. 8, 9) на участке в окрестности 800 м. В момент, когда парожидкостная подушка у задвижки схлопнулась и в конце трубопровода осталась только жидкость, наблюдается классическая картина гидроудара (см. рис. 9).

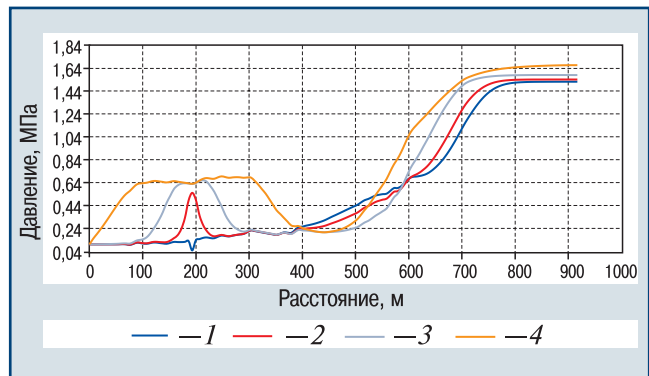


▲ Рис. 9. Профиль давления через 3,7394 с (линия 1); 3,7728 с (линия 2); 3,787 с (линия 3) и 3,8021 с (линия 4) после начала закрытия задвижки

▲ Fig. 9. Pressure profile in 3.7394 s (line 1); 3.7728 s (line 2); 3.787 s (line 3) and 3.8021 s (line 4) after the start of valve closing

На момент времени 5,0975 с на отрезке 200 м наблюдается единственный участок с наличием паровой фазы (рис. 10), остальные зоны парожидкостных потоков схлопнулись.

Далее и эта парожидкостная прослойка схлопывается и возникает очередная подъем давления

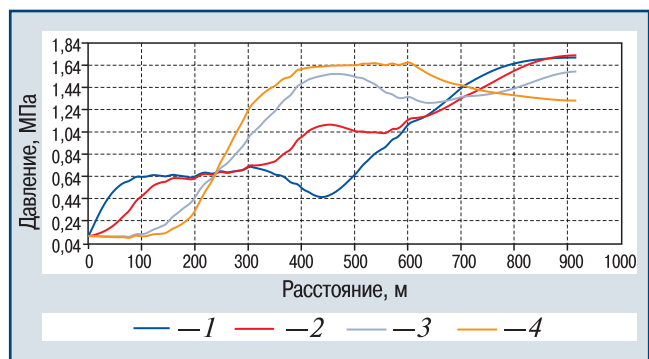


▲ Рис. 10. Профиль давления через 5,0975 с (линия 1); 5,1142 с (линия 2); 5,1476 с (линия 3) и 5,2228 с (линия 4) после начала закрытия задвижки

▲ Fig. 10. Pressure profile after 5.0975 s (line 1); 5.1142 s (line 2); 5.1476 s (line 3) and 5.2228 s (line 4) after the start of valve closing

(см. рис. 10). Волна сжатия распространяется в обе стороны, и видно, что в районе отметки 450 м она сталкивается с волной, идущей влево со стороны закрытой задвижки.

При взаимодействии этих волн возникает очередной подъем давления (рис. 11).

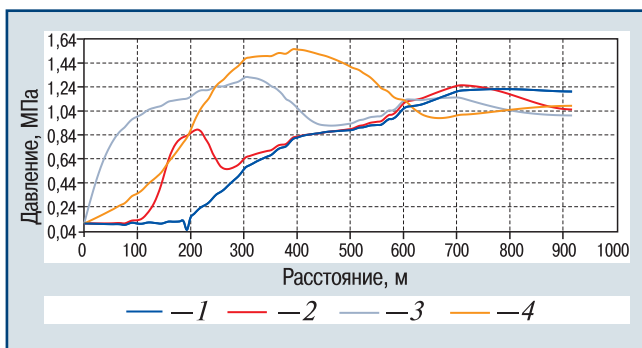


▲ Рис. 11. Профиль давления через 5,2688 с (линия 1); 5,3189 с (линия 2); 5,3941 с (линия 3) и 5,4485 с (линия 4) после начала закрытия задвижки

▲ Fig. 11. Pressure profile in 5.2688 s (line 1); 5.3189 s (line 2); 5.3941 s (line 3) and 5.4485 s (line 4) after the start of valve closing

Далее картина повторяется: давление падает, возникают зоны, где жидкость начинает вскипать, потом эти зоны схлопываются и т.д.

Пример повторного образования парожидкостного объема и еще один рост давления на отметке 200 м показан на рис. 12. Хорошо видно исчезновение парожидкостной подушки и последующий рост давления. Это схлопывание кавитационной области сопровождается столкновением потоков справа и слева, что, как отмечалось выше, можно рассматривать как локальный (на этот раз повторный) гидроудар в зоне кавитации. Такие скачки давления не возникают в гомогенных потоках среды. Понятно, что сила гидроудара (максимальное значение дав-



▲ Рис. 12. Профиль давления через 8,8373 с (линия 1); 8,8833 с (линия 2); 9 с (линия 3) и 9,1591 с (линия 4) после начала закрытия задвижки

▲ Fig. 12. Pressure profile in 8.8373 s (line 1); 8.8833 s (line 2); 9 s (line 3) and 9.1591 s (line 4) after the start of valve closing

ления в пике скачка) зависит от того, насколько «в фазе» колеблются различные столбы сплошной жидкости с обеих сторон, насколько они протяженны, какова скорость встречного движения и т.д.

#### Анализ результатов моделирования

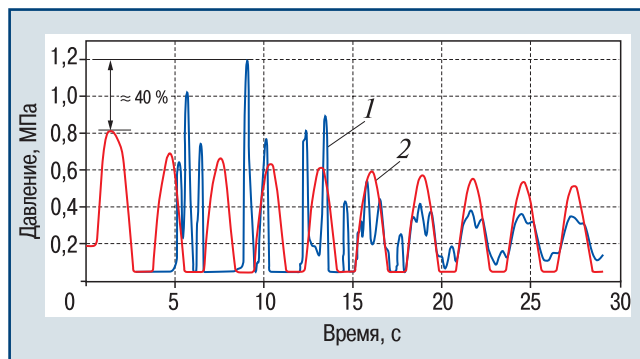
Выше были представлены профили давления при моделировании течения в трубопроводе после закрытия задвижки с учетом возможного вскипания жидкости. Для сравнения рассмотрим результаты моделирования упомянутого нестационарного процесса с результатами, полученными по модели без возможного вскипания жидкости, например согласно [11].

Такое сравнение позволит оценить роль кавитационных процессов и степень их важности при моделировании гидроудара.

Результаты численного моделирования описанной выше задачи по этим двум моделям представлены на рис. 13 (здесь 1 — с учетом вскипания; 2 — без учета вскипания). Расчеты проводились с применением программного средства ТОХИ+Гидроудар [12], которое является одной из программ серии ТОХИ+ [13–17], предназначенной для автоматизации расчетов в области количественной оценки риска и оценки последствий аварий. Приведены показания датчика давления, расположенного на 190 м от начала трубопровода. Сразу отметим, что без учета кавитации полученные результаты практически полностью совпадают с результатами работы [11], т.е. используемые в данной работе методы и подходы не противоречат существующей мировой практике.

На рис. 13 наблюдается полное совпадение результатов моделирования с момента начала закрытия задвижки до 3,7 с, однако после отражения волны разгрузки у начала трубопровода картина течения существенно меняется в зависимости от того, учитывалась или нет возможность появления парожидкостных участков.

Также хорошо видно, что превышение давления в указанной точке трубопровода при учете возможного образования парожидкостных потоков над давлени-



▲ Рис. 13. Давление в трубопроводе с учетом (линия 1) и без учета (линия 2) возможного вскипания нефти

▲ Fig. 13. Line pressure with (line 1) and without (line 2) considering possible oil boiling

нием в этой же точке трубопровода без учета этого фактора составляет примерно 40 %. Это означает, что учитывать кавитацию жидкости при моделировании гидродинамики в трубопроводе необходимо, особенно при моделировании нештатных, предаварийных и аварийных ситуаций. Учет этого фактора может вскрыть дополнительные угрозы и помочь разработать меры по их предотвращению.

#### Заключение

В работе в рамках подхода С.К. Годунова предложен новый численный метод решения системы уравнений, описывающих одномерное движение слабосжимаемой изотермической вскипающей жидкости в трубопроводе с упругими деформируемыми стенками.

Проведенное численное моделирование показало, что в трубопроводе при нештатных ситуациях могут формироваться столбы жидкости, разделенные зонами кавитации (вскипания жидкости) и колеблющиеся в разных фазах (появление зон кавитации, как показывают расчеты, зависит, в частности, и от высотного профиля трубопровода), соответственно при схлопывании зон кавитации, служащих своеобразными демпферами давления, происходят столкновения столбов жидкости, которые могут приводить, в зависимости от соотношения скоростей, к гидроударам, возникающим не на задвижках, а на линейной части трубопровода (локальные гидроудары). Волны от этих схлопываний, взаимодействуя друг с другом, создают новые пики по давлению, отнюдь не совпадающие с картиной простой циркуляции волн, которые предсказываются при моделировании, не учитывающем возможное вскипание жидкости.

Понятно, что в случае различных диаметров и длин трубопроводов, а также высотного профиля трубопровода может возникать спектр еще более разнообразных ситуаций. В связи с этим следует сделать один важный вывод — анализ нагрузок на трубопровод при возникновении явления гидроудара следует проводить с учетом возможного вскипания жидкости.

Полученные в статье результаты подтверждают важность учета возможного вскипания при моделировании движения жидкости в протяженном трубопроводе в целях расчета как внутренних параметров течения, так и интенсивности выброса вещества в результате аварийных ситуаций с учетом того факта, что при выбросе из трубопровода в нем происходит циркуляция волн сжатия (разрежения), а комбинация этих волн в значительной степени определяет интенсивность выброса.

Следует отметить, что при моделировании течений в магистральных трубопроводах в данной работе не учитывались эффекты непосредственного воздействия кавитации на стенки трубопровода, способные вызвать их нагрев и разрушение. Однако полученные результаты такого моделирования позволяют идентифицировать места потенциального разрушения трубопровода, где такое воздействие возможно и существует вероятность эрозии стенок труб.

### Список литературы

1. Лурье М.В. Теоретические основы трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. — М.: Недра. — 2017. — 477 с.
2. Лурье М.В., Полянская Л.В. Об опасном источнике волн гидравлического удара в рельефных нефте- и нефтепродуктопроводах// Нефтяное хозяйство. — 2000. — № 8. — С. 66–68.
3. 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.phpro.2015.09.108
4. 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.
5. Годунов С.К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики// Математический сборник. — 1959. — Т. 47. — № 3. — С. 271–306.
6. 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. — 2016. — Vol. 751. — № 1. — P. 12–22.
7. Bergant A., Simpson A.R. Pipeline column separation flow regimes// Journal of Hydraulic Engineering. — 1999. — Vol. 125. — P. 835–848.
8. Jinping L.I., Peng W.U., Jiandong Y.A.N.G. CFD Numerical simulation of water hammer in pipeline based on the Navier-Stokes equation. URL: <http://congress2.cimne.com/eccomas/proceedings/cfd2010/papers/01560.pdf> (дата обращения: 12.08.2020).
9. 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.
10. Experimental Study of Water Hammer Phenomena in Drinking Water Pipeline Distribution Using Video Camera Method/ A. Maryono, Suhanan, A. Kurniawan, M. Alatas et al.//

International Journal of Scientific & Engineering Research. — 2013. — Vol. 4. — Iss. 2. — P. 1–8.

11. Арбузов Н.С. Обеспечение технологической безопасности гидравлической системы морских нефтеналивных терминалов в процессе налива судов у причальных сооружений: дис. ... д-ра техн. наук. — М.: ООО «ИМС Индастриз», 2014. — 310 с.
12. Программное средство «ТОХИ+Гидроудар». Программные средства по промышленной безопасности ТОХИ+. URL: <https://toxi.ru/produkty/programmnoe-sredstvo-toxidroudar> (дата обращения: 12.08.2020).
13. Моделирование аварийных процессов с выбросом опасного вещества с использованием программного комплекса ТОХИ+Risk/ Е.А. Хамидуллина, Т.И. Дроздова, О.А. Давыдкина, А.А. Агапов// Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 7. — С. 75–79.
14. Верификация программного комплекса ТОХИ+Risk 5 в части моделирования пожаров пролива горючих жидкостей и «огненного шара» / А.А. Агапов, А.С. Софьин, С.Х. Зайнетдинов, В.В. Банников// Безопасность труда в промышленности. — 2018. — № 8. — С. 7–14. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-8-7-14
15. Сравнительный анализ результатов моделирования последствий химических аварий с использованием программного комплекса ТОХИ+Risk/ Т.В. Савицкая, А.Ф. Егоров, Л.А. Запасная и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 8. — С. 78–83.
16. Егоров А.Ф., Савицкая Т.В., Агапов А.А. Опыт использования программного комплекса ТОХИ+Risk для подготовки специалистов// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 5. — С. 22–24.
17. Использование программного комплекса ТОХИ+Risk для оценки пожарного риска/ А.А. Агапов, И.О. Лазукина, А.Л. Марухленко и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2010. — № 1. — С. 46–52.

sverchkov@safety.ru

Материал поступил в редакцию 23 сентября 2020 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 11, pp. 7–14.  
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-11-7-14

### Recording of the Cavitation Phenomena when Modeling Flows in the Trunk Pipelines

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

### Abstract

In the article, it is proposed to use a numerical method based on the approach of S.K. Godunov to simulate boiling in a pipeline. The paper presents a statement of the real problem of modeling a water hammer, considering possible boiling of the transported liquid on a real object — an oil pipeline. When solving the problem, two variants of flow modeling when closing the valve installed at the end of the pipeline were carried out. In the first

case, the possibility of liquid boiling was not considered. In the second case, this opportunity was considered.

The performed numerical simulation showed that in the pipeline in emergency situations, liquid columns can be formed, separated by the cavitation zones and oscillating in different phases, respectively, at the collapse of the cavitation zones, which serve as a kind of pressure dampers, the collisions of liquid columns occur, which can lead, depending on the ratio of velocities, to hydraulic shocks that occur not on the valves, but on the linear part of the pipeline (local hydraulic shocks). The waves from these collapses, interacting with each other, create the new pressure peaks that do not coincide with the pattern of simple wave circulation, which are predicted in the simulations that do not consider possible liquid boiling.

As a result, the pressures reached in the pipeline during fluid hammer is significantly different from what it would be in the absence of boiling. When boiling is considered, the maximum reached pressures are 40 % higher. Moreover, this excess is repeated. The detailed analysis of the pressure profile in the pipeline is given in the article. Based on the results of solving this problem, it is concluded that when modeling pre-emergency and emergency situations in the pipeline, it is necessary to consider the process of possible liquid boiling, since sometimes, as in the presented case, the values of the pressure surges can be higher than the values of the pressure surges in the liquid without considering boiling, which increases the likelihood of emergency depressurization.

**Key words:** transient processes, S.K. Godunov method, fluid hammer, pipeline transport, pipeline depressurization, cavitation, TOXI+Fluid hammer.

## References

1. Lure M.V. Theoretical foundations of the pipeline transport of oil, oil products and gas: textbook. Moscow: Nedra, 2017. 477 p. (In Russ.).
2. Lure M.V., Polyanskaya L.V. On hazardous source of the fluid hammer waves in the relief oil and oil product pipelines. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*. 2000. № 8. pp. 66–68. (In Russ.).
3. Sumskoi 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
4. Sumskoy S.I., Agapov A.A., Sofin A.S., Sverchkov A.M., Egorov A.F. Simulation of Abnormal Leakages on Trunk Pipelines. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2014. № 9. pp. 50–53. (In Russ.).
5. Godunov S.K. A Finite Difference Method for the Computation of Discontinuous Solutions of the Equations of Fluid Dynamics. *Matematicheskij sbornik = Sbornik: Mathematics*. 1959. Vol. 47. № 3. pp. 271–306. (In Russ.).
6. Sumskoi 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*. 2016. Vol. 751. № 1. pp. 12–22.
7. Bergant A., Simpson A.R. Pipeline column separation flow regimes. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1999. Vol. 125. pp. 835–848.
8. Jinping L.I., Peng W.U., Jiandong Y.A.N.G. CFD Numerical simulation of water hammer in pipeline based on the Navier-Stokes equation. Available at: <http://congress2.cimne.com/eccomas/proceedings/cfd2010/papers/01560.pdf> (accessed: August 12, 2020).
9. 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.
10. Maryono A., Suhanan, Kurniawan A., Alatas M., Akhita A.M.R., 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.
11. Arbuzov N.S. Ensuring technological safety of the hydraulic system of offshore oil terminals in the process of loading ships at the mooring structures: thesis... Doctor of Technical Sciences. Moscow: OOO «IMS Indastriz», 2014. 310 p. (In Russ.).
12. TOXI+Fluid hammer software. Software on industrial safety TOXI+. Available at: <https://toxi.ru/produkt/programmnoe-sredstvo-toxidroudard> (accessed: August 12, 2020). (In Russ.).
13. Khamidullina E.A., Drozdova T.I., Davydkina O.A., Agapov A.A. Modeling of Emergency Processes with Release of Hazardous Substance Using Software Complex TOXI+Risk. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2015. № 7. pp. 75–79. (In Russ.).
14. Agapov A.A., Sofin A.S., Zaynetdinov S.Kh., Bannikov V.V. Verification of TOXI + Risk 5 Software Package with Regard to Modeling of the Pool Fire Combustible Liquids and the «Fire ball». *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2018. № 8. pp. 7–14. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2018-8-7-14
15. Savitskaya T.V., Egorov A.F., Zapasnaya L.A., Dementienko A.V., Karibova Yu.A. Comparative Analysis of the Results of Modeling of Chemical Accidents Consequences Using Software TOXI+Risk. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2012. № 8. pp. 78–83. (In Russ.).
16. Egorov A.F., Savitskaya T.V., Agapov A.A. Experience of Using TOXI+Risk Software for Specialists Training. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2012. № 5. pp. 22–24. (In Russ.).
17. Agapov A.A., Lazukina I.O., Marukhlenko A.L., Marukhlenko S.L., Sofin A.S. Use of Software Complex TOXI+Risk for Fire Risk Assessment. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2010. № 1. pp. 46–52. (In Russ.).

Received September 23, 2020

