

дами, изложенными в акте, и оформления особого мнения.

В соответствии с требованиями ФНП ОРПД для постановки на учет оборудования, работающего под избыточным давлением, в территориальном органе Ростехнадзора эксплуатирующая организация направляет в этот орган комплект документов, в который входят копии акта готовности оборудования, работающего под избыточным давлением, к вводу в эксплуатацию и распорядительного документа эксплуатирующей организации о вводе его в эксплуатацию.

Основной проблемой при обработке представляемых документов является то, что в настоящее время в ФНП ОРПД не установлены требования к содержанию акта готовности. В целях унификации информации, представляемой при постановке на учет оборудования, работающего под избыточным давлением, необходимо установление в ФНП ОРПД требований к форме акта готовности оборудования к пуску в работу.

Решение по выявленным организационным проблемам практической реализации новых требований к процедурам ввода в эксплуатацию оборудования, работающего под избыточным давлением,

должно быть отражено в новой редакции Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением».

### Список литературы

1. *Правила* промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности. — Сер. 20. — Вып. 16. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. — 254 с.
2. *Технический* регламент Таможенного союза «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением» (ТР ТС 032/2013). — Сер. 20. — Вып. 14. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. — 76 с.
3. *О промышленной* безопасности опасных производственных объектов: федер. закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. — 56 с.
4. *О техническом* регулировании: федер. закон от 27 дек. 2002 г. № 184-ФЗ. — 8-е изд., испр. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. — 80 с.

[gontarenko@safety.ru](mailto:gontarenko@safety.ru)

Материал поступил в редакцию 10 апреля 2017 г.

УДК 532.5-1/-9:519.857.6:51-37

© С.В. Прокудин, А.С. Софьин, А.А. Агапов, 2017

## Аналитическое решение задачи одномерного стационарного течения сжимаемой жидкости и газа



**С.В. Прокудин,**  
вед. специалист



**А.С. Софьин,**  
канд. техн. наук,  
зав. отделом  
[toxi@safety.ru](mailto:toxi@safety.ru)



**А.А. Агапов,**  
канд. техн. наук,  
директор расчетно-аналитического центра

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия

Представлено обобщенное аналитическое решение задачи определения параметров одномерного стационарного течения газа, сжимаемой жидкости или двухфазной среды. Проведена проверка полученных соотношений при определении аварийного дебита газовых скважин, а также параметров течения жидких сред в трубопроводах.

**Ключевые слова:** математическая модель, одномерное стационарное течение, нефтегазодобыча, фонтанирование скважины, трубопроводный транспорт, оценка последствий аварий.

DOI: 10.24000/0409-2961-2017-5-36-41

### Введение

Один из наиболее разрушительных сценариев аварии на опасных производственных объектах (ОПО) нефтегазодобычи — образование фонтанов на скважинах. Такие аварии обычно сопровождаются выбросом значительного количества опасных веществ в окружающую среду и нередко при вос-

пламенении приводят к тяжелым последствиям, связанным с поражением людей, разрушением оборудования куста скважин и прилегающих объектов, нанесением ущерба окружающей среде.

Математическое моделирование аварийных процессов, возникающих при фонтанировании скважин, — обязательная процедура при подготовке

декларации промышленной безопасности, расчетах пожарного риска и риска аварий, а также при разработке планов ликвидации аварийных ситуаций и разливов нефти для рассматриваемых ОПО. Основные положения и рекомендации по выполнению таких работ для нефтяных и газовых скважин представлены в руководстве по безопасности [1]. Вопросам анализа риска на газовых и газоконденсатных скважинах также посвящен стандарт ПАО «Газпром» [2].

Одной из основных характеристик, которые влияют на масштабы последствий образования фонтанов скважин, является аварийный дебит. Для определения этой величины используют математические модели течения газа и жидкости по стволу скважины, изложенные в [1, 2] и позволяющие рассматривать аварийные процессы в динамической и стационарной постановке. Указанные модели базируются на общеизвестных дифференциальных уравнениях гидрогазодинамики и общепринятых допущениях, подробно изложенных, например, в [3].

Представленные в [2, 4] результаты расчета истечения из устья газовых скважин по динамическим моделям показывают, что расход продукта скважины резко снижается и выходит на стационарное значение за 10–20 с. Исходя из этих соображений вкладом начальной стадии аварии обычно пренебрегают, а расход определяют на стадии стационарного течения. Динамические модели же методика [1] рекомендует использовать для расчетов залповых выбросов при мгновенной разгерметизации устья закрытых скважин.

В части практического использования стационарные модели отличаются более простой реализацией, как следствие, расчет по этим моделям занимает меньше машинного времени. В их основе лежит уравнение сохранения количества движения в дифференциальной форме, которое требует численного решения, например методами Рунге — Кутты [5]. Задача дополнительно осложняется необходимостью выполнения итерационных вычислений, что существенно увеличивает объем расчетной работы. Приведение решения к интегральной или даже аналитической форме существенно упрощает вычисления по данным моделям. Поиску таких зависимостей и посвящена настоящая статья.

#### Приведение уравнения количества движения к интегральной форме

Согласно [1] система решаемых уравнений состоит из уравнения сохранения количества движения

$$\frac{d(\rho W^2)}{dl} + \frac{dP}{dl} = -\frac{\lambda_i \rho W |W|}{2d_i} + \rho g \cos \alpha_{zi}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность флюида, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  — линейная скорость потока, м/с;  $l$  — расстояние от устья скважины, м;  $P$  — давление по длине скважины, Па;  $\lambda_i$  — коэффициент гидравлического сопротивления;

$d_i$  — гидравлический диаметр канала  $i$ -й секции скважины, м;  $\alpha_{zi}$  — угол отклонения трубы от вертикали  $i$ -й секции скважины, градус,

а также уравнения непрерывности потока (массовый расход по всей длине скважины полагается постоянным)

$$M = \rho Q = \rho W S_i, \quad (2)$$

где  $M$  — массовый расход флюида, кг/с;  $Q$  — объемный расход флюида в условиях потока, м<sup>3</sup>/с;  $S_i$  — площадь сечения канала, м<sup>2</sup>,

и уравнения состояния. Для газа рекомендуется использовать уравнение состояния с учетом коэффициента сжимаемости [3]:

$$\rho_g = \rho_{0g} \frac{T_0}{T} \frac{1}{Z} \frac{P}{P_0}, \quad (3)$$

где  $\rho_g$  и  $\rho_{0g}$  — плотность газа соответственно в условиях течения и при нормальных условиях (НУ), кг/м<sup>3</sup>;  $T$  и  $T_0$  — температура соответственно в условиях потока и при НУ, К;  $Z$  — коэффициент сжимаемости газа;  $P$  и  $P_0$  — давление соответственно в потоке и при НУ, Па.

Для жидких слабосжимаемых сред может быть использовано уравнение состояния, приведенное в [6, 7], которое в изотермическом допущении имеет вид

$$W_{зв}^2 (\rho_{ж} - \rho_{0ж}) = P - P_0, \quad (4)$$

где  $W_{зв}$  — скорость звука в секции скважины (трубопроводе), м/с;  $\rho_{ж}$  и  $\rho_{0ж}$  — плотность жидкости соответственно в условиях истечения и при НУ, кг/м<sup>3</sup>.

Принимая во внимание формулы (3) и (4), запишем уравнение состояния в обобщенном виде

$$\rho = PA + B, \quad (5)$$

где  $A, B$  — постоянные коэффициенты.

Коэффициенты  $A, B$  для газа:

$$A = \rho_{0g} \frac{T_0}{TZP_0}; \quad B = 0. \quad (6)$$

Коэффициенты  $A, B$  для жидкости:

$$A = \frac{1}{W_{зв}^2}; \quad B = \rho_{0ж} - \frac{P_0}{W_{зв}^2}. \quad (7)$$

Для смеси газа и жидкости можно вывести следующие выражения:

$$A = \rho_{0g} \frac{T_0}{TZP_0} (1 - \delta_{ж}) + \frac{\delta_{ж}}{W_{зв.ж}^2}; \quad B = \left( \rho_{0ж} - \frac{P_0}{W_{зв.ж}^2} \right) \delta_{ж}, \quad (8)$$

где  $\delta_{ж}$  — объемная доля жидкой фазы в смеси при НУ;  $W_{зв,ж}$  — скорость звука в жидкости, м/с.

Необходимо отметить, что выражения (8) подходят для расчета смесей, все компоненты которых в поперечном сечении скважины имеют одинаковую скорость. При наличии, например, в скважине эффекта «газлифт» применение такого уравнения состояния двухфазной среды может привести к занижению аварийного дебита.

С учетом (2) и (5) выражение для давления в потоке примет вид:

$$P = \frac{M}{AW S_i} - \frac{B}{A}. \quad (9)$$

Все дальнейшие преобразования справедливы при выполнении следующих допущений:

температура вещества в  $i$ -й секции скважины не меняется  $T = \text{const}$ . Данное допущение общепринято для газовых скважин и активно используется при расчетах газопроводов [2, 3], а также содержится в методике [1]. При этом в качестве расчетной температуры рекомендуется брать среднюю температуру по скважине;

коэффициент гидравлического сопротивления в  $i$ -й секции скважины постоянен  $\lambda_i = \text{const}$ . Это также традиционное допущение для расчета течений газовых сред [3, 8]. В [8]  $\lambda_i$  для расчета потока в круглой трубе принимается равным 0,024, а в кольцевом сечении — 0,02;

коэффициент сжимаемости газа постоянен  $Z = \text{const}$ . В [3] указывается, что  $Z$  в большинстве магистральных газопроводов изменяется весьма незначительно, также данное допущение присутствует в [1] для газовых скважин;

влияние фазовых переходов незначительно,  $\delta_{ж} = \text{const}$ ;

постоянство скорости звука в жидкости (при ее наличии).

После подстановки (9) в уравнение сохранения количества движения уравнение (1) примет форму:

$$\begin{aligned} \frac{M}{S_i} \frac{dW}{dl} + \frac{d\left(\frac{M}{AS_i W} - \frac{B}{A}\right)}{dl} = \\ = \frac{\lambda_i M W}{2d_i S_i} + \frac{Mg \cos \alpha_{zi}}{S_i W}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $d_i$  — гидравлический диаметр  $i$ -го участка скважины;  $g$  — ускорение свободного падения.

Обозначив  $H = 2d_i g \cos \alpha_{zi}$ , после преобразований получим выражение зависимости скорости потока от расстояния до конечной точки скважины в интегральном виде:

$$2d_i \int_{W_{i \text{ кон}}}^{W_{i \text{ нач}}} \frac{AW^2 - 1}{AW(\lambda_i W^2 + H)} dW = L_i, \quad (11)$$

где  $W_{i \text{ нач}}$  — скорость в начале  $i$ -го участка скважины;  $W_{i \text{ кон}}$  — скорость в конце  $i$ -го участка скважины;  $L_i$  — длина  $i$ -го участка скважины.

### Аналитическое решение уравнения сохранения количества движения и его особенности

В результате интегрирования (11) получаем аналитическую формулу, связывающую скорость течения продукта по  $i$ -й секции скважины с ее длиной:

$$d_i \frac{(AH + \lambda_i) \ln(\lambda_i W^2 + H) - \lambda_i \ln W^2}{A \lambda_i H} \Bigg|_{W_{i \text{ кон}}}^{W_{i \text{ нач}}} = L_i. \quad (12)$$

Заметим, что уравнение (12) не содержит массового расхода продукта, таким образом эпюра скорости потока в каждой секции зависит только от значения скорости на выходе потока. Данное значение неизвестно и подбирается в процессе расчета итерационно. В качестве предельной оценки скорости газа на устье  $W_y$  в [8], а также методике [1] предлагается условие  $W_y \leq W_{зв,г}$ , где  $W_{зв,г}$  — скорость звука в газе на устье.

Однако из выражения (11) следует, что скорость потока в скважине должна быть ограничена соотношением:

$$W < 1/\sqrt{A}, \quad (13)$$

так как при скорости потока  $W > 1/\sqrt{A}$  могут получаться отрицательные значения расстояния до конечной точки скважины, что не имеет физического смысла. Результаты расчетов по соотношению (12), представленные на рис. 1, подтверждают данный факт.

Как видно из полученных графиков давления и скорости, при ограничении по скорости звука (кривые 2 и 4, см. рис. 1) в устье скважины возможны два значения давления и скорости потока, при этом часть потока оказывается вне скважины. Подставив известное соотношение для расчета скорости звука в газе

$$W_{зв,г} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}, \quad (14)$$

где  $W_{зв,г}$  — скорость звука в газе;  $\gamma$  — показатель адиабаты газа;  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $\mu$  — молярная масса газа, кг/моль, и выражение для коэффициента  $A$  (6) в (13), получим соотношение (15):

$$W < W_{зв,г} \sqrt{\frac{Z}{\gamma}}. \quad (15)$$

Соотношение (15) свидетельствует о том, что максимальная скорость газа, текущего по трубопроводу с постоянным поперечным сечением, зависит не только от скорости звука в среде, но и от

свойств вещества среды, в ряде случаев может быть меньше  $W_{зв.г}$ . Таким образом, при подборе скорости потока на устье для газов и гетерогенных сред максимальное значение следует выбирать не из условия равенства скорости звука, а с учетом ограничения (13).

Давление в потоке можно рассчитать по формуле (9).

Проверку полученных соотношений (11, 12) проводили по опубликованным в [2] примерам расчетов, а также по известным фактам аварий [8]. Приведем три характерных примера таких сопоставлений.

Пример 1 (раздел В.3 приложения к [2]). Вещество — метан; плотность газа при НУ —  $0,668 \text{ кг/м}^3$ ;  $l = 2 \text{ км}$ ; наружный диаметр канала  $d_{нар} = 0,2 \text{ м}$ ; внутренний диаметр канала  $d_{вн} = 0,127 \text{ м}$ ; давление в пласте  $P_{пл} = 22,697 \text{ МПа}$ ;  $W_{зв.г} = 400 \text{ м/с}$ ; среднее значение коэффициента сжимаемости  $Z_{ср} = 1$ ; средняя температура  $T_{ср} = 340 \text{ К}$ . Коэффициент сопротивления принимался равным  $0,024$  в соответствии с [8].

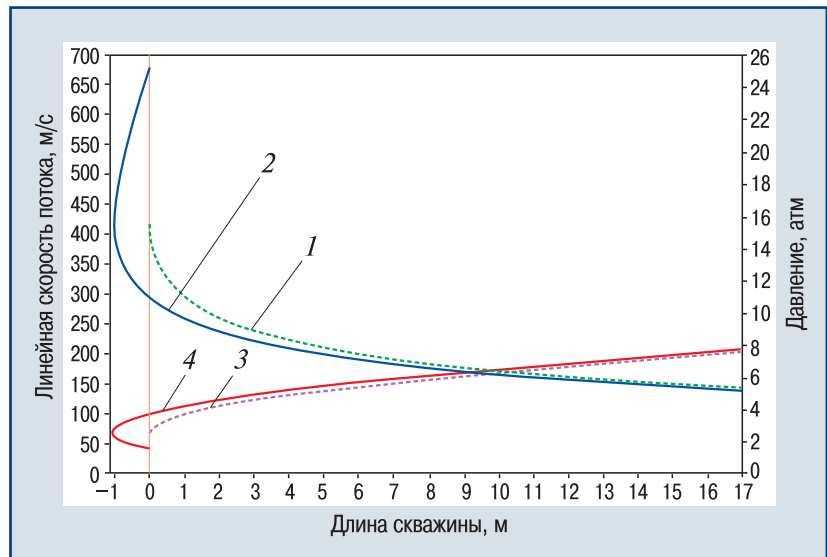
Аварийный дебит на этапе стационарного истечения из скважины, определенный с использованием зависимостей (12), составил около  $40,7 \text{ кг/с}$ , что не противоречит результатам расчета аналогичной задачи в динамической постановке (рис. 2) [2].

Пример 2. В разделе 3 главы 3 [8] приведены данные, относящиеся к фонтану на скважине № 18 Ачакского месторождения:  $l = 1,34 \text{ км}$ ; газ движется по затрубному каналу,  $d_{нар} = 0,2 \text{ м}$ ,  $d_{вн} = 0,114 \text{ м}$ ;  $P_{пл} = 19,5 \text{ МПа}$ ; коэффициенты фильтрационного сопротивления  $a = 0,155 \text{ МПа}^2/\text{м}^3/\text{с}$ ,  $b = 0,045 \text{ МПа}^2/(\text{м}^3 \text{ с})^2$ . Дебит газа определялся в [8] при давлении на устье  $6 \text{ МПа}$  (условие прочности верхнего участка ствола) и составил  $4,8 \text{ млн м}^3/\text{сут}$  ( $55,54 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

При расчете данной задачи по (12) принималось дополнительно: коэффициент сопротивления —  $0,024$  в соответствии с [8]; плотность природного газа при НУ — от  $0,668$  до  $0,85 \text{ кг/м}^3$ ;  $T_{ср} = 320 \div 370 \text{ К}$ ;  $W_{зв.г} = 430 \div 470 \text{ м/с}$ ;  $Z_{ср} = 1$ . Аварийный дебит, вычисленный по (11), (12), с учетом неопределенности исходных данных находится в диапазоне от  $52,7$  до  $59,53 \text{ м}^3/\text{с}$ . Значение аварийного дебита  $56,15 \text{ м}^3/\text{с}$ , представленное в [8], лежит немного правее середины полученного интервала, что также свидетельствует о согласованности полученных результатов.

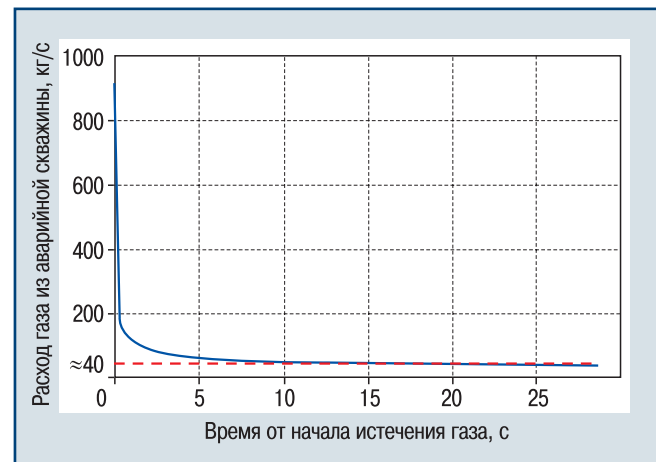
Пример 3 посвящен анализу и сравнению стационарного течения сжимаемой жидкости по трубопроводу по формуле (12) и программе ТОХИ+Гидроудар [9, 10].

Программа ТОХИ+Гидроудар позволяет рассчитывать нестационарное одномерное течение стабильных жидкостей в трубопроводных системах с



▲ Рис. 1. Распределение давления и скорости потока газа по длине скважины:

1 — скорость потока, полученная при ограничении (13); 2 — скорость потока, полученная при ограничении  $W_y < W_{зв.г}$ ; 3 — давление в потоке при ограничении (13); 4 — давление в потоке при ограничении  $W_y < W_{зв.г}$



▲ Рис. 2. Результаты расчета зависимости аварийного дебита газовой скважины от времени, прошедшего с момента начала фонтанирования, представленные в [2]

учетом высотного профиля трубопроводов, мест расположения и гидравлических характеристик элементов трубопроводной системы, в том числе запорной арматуры, насосов, предохранительных клапанов и т.д. В основе этой программы лежит система дифференциальных уравнений гидродинамики, для решения которых использован метод конечных разностей, относящийся к подразделу механики сплошных сред — вычислительной гидродинамике (англ. Computational fluid dynamics — CFD) [9].

Рассматривается течение жидкости с плотностью  $\rho_0 = 870 \text{ кг/м}^3$  (при НУ) по трубопроводу с внутренним диаметром  $0,2 \text{ м}$  и длиной  $1 \text{ км}$ . Трубопровод расположен под углом  $75^\circ$  относительно горизонтали. Давление на входе в трубопровод составляет  $10 \text{ МПа}$ . Коэффициент гидравлического сопротив-



ления для такого течения меняется слабо и составляет 0,023.

По результатам расчета с использованием зависимости (12) определены следующие параметры течения: расход в трубопроводе — 156 кг/с (0,1795 м<sup>3</sup>/с), скорость на входе  $W_{\text{нач}}$  и на выходе  $W_{\text{кон}}$  из трубопровода составила соответственно 5,67 и 5,71 м/с. Давление на выходе равно атмосферному.

Расчет по программе ТОХИ+Гидроудар с учетом начального и конечного давления, а также расхода показал, что скорость жидкости в трубопроводе будет возрастать к концу трубопровода от 5,58 до 5,61 м/с. Отклонение значений скоростей по сравнению с (12) составило не более 2 % и вызвано использованием приближенных численных методов при решении, что является аргументом в пользу корректности полученных соотношений (11), (12) в части их применения для расчета параметров стационарного течения жидкости в трубопроводах.

Необходимо заметить, что формула (12) не может быть использована в задачах с горизонтальными трубопроводами ( $\alpha_{zj} = 90^\circ$ ). Однако для таких случаев может быть получено отдельное соотношение. Если положить  $H = 0$  (что соответствует  $\alpha_{zj} = 90^\circ$ ) в (11), то уравнение приобретет следующий вид:

$$2d_i \int_{W_{i \text{ кон}}}^{W_{i \text{ нач}}} \frac{AW^2 - 1}{A\lambda_i W^3} dW = L_i. \quad (16)$$

В результате интегрирования уравнения (16) получается аналитическое соотношение для горизонтального трубопровода

$$\frac{d_i}{\lambda_i} \left( \ln W^2 + \frac{1}{AW^2} \right) \Bigg|_{W_{i \text{ кон}}}^{W_{i \text{ нач}}} = L_i. \quad (17)$$

Необходимо отметить, что полученные соотношения (11), (12) и (17) — один из методов решения исходной системы уравнений (1), (2), представленной в [1]. Так как в [1] не оговариваются способы решения (1), (2), то можно утверждать, что использование полученных в статье зависимостей для газа и жидкости не противоречит рекомендациям Ростехнадзора в части расчета аварийного дебита скважин.

Соотношения (11), (12) и (17) реализованы в модуле «Скважина» сертифицированного программного комплекса ТОХИ+Risk 5 для расчетов последствий аварий с выбросом опасных веществ и оценки риска [11]. С помощью данного модуля проведены вычисления, представленные в статье.

### Выводы

1. На основе методики [1] получены аналитические соотношения для расчета параметров стационарного течения газообразных, двухфазных и жидких сред по стволу скважины, в том числе для определения аварийного дебита скважины при ее

фонтанировании. Полученные соотношения позволяют существенно упростить процесс вычисления по сравнению с численным решением уравнения количества движения (1).

2. Предельное значение скорости газа на устье с учетом принятых допущений зависит не только от скорости звука, но и от коэффициента сжимаемости и постоянной адиабаты истекающего вещества.

3. Показана адекватность результатов, полученных по представленным в статье зависимостям, путем их сравнения с опубликованными вычислениями по иным математическим моделям.

4. Продемонстрирована возможность использования уравнений (11) и (12) для расчета параметров стационарного течения в трубопроводах. Получено аналитическое соотношение (17) для расчета параметров течения среды по горизонтальному трубопроводу.

5. Полученные в настоящей статье зависимости (11), (12) и (17) для газа и жидкости могут быть использованы при расчете аварийного дебита скважин в соответствии с руководством по безопасности Ростехнадзора [1] в рамках указанных допущений.

### Список литературы

1. Методика анализа риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазодобычи: рук. по безопасности: приказ Ростехнадзора от 17 авг. 2015 г. № 317. — Сер. 08. — Вып. 28. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. — 48 с.
2. СТО Газпром 2-2.3-400—2009. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром». — М.: ООО «Газпром экспло», 2009.
3. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. пособие. — М.: Центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2012. — 456 с.
4. Мельников А.В. Анализ эксплуатации объектов добычи и подготовки газа на месторождениях крайнего севера (на примере Бованенковского НГКМ): дис. ... канд. техн. наук. — М., 2009. — 166 с.
5. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: учеб. пособие для ВУЗов. — М.: Наука, 1989. — 432 с.
6. Modelling of non-equilibrium flow in the branched pipeline systems/ S.I. Sumskoj, A.M. Sverchkoj, M.V. Lisanov, A.F. Egorov// Journal of Physics: Conference Series 751. — 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/751/1/012022.
7. Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов: рук. по безопасности. — Сер. 08. — Вып. 24. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. — 122 с.
8. Малеванский В.Д., Шеберстов Е.В. Гидродинамические расчеты режимов глушения фонтанов в нефтяных и газовых скважинах. — М.: Недра, 1990. — 246 с.
9. 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.

10. *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.

11. *TOXI+Risk 5* для расчета последствий аварий с выбросом опасных веществ и оценки риска. URL: <https://toxi.ru/produkty/programmnyi-kompleks-toxirisk-5> (дата обращения: 29.03.2017).

[toxi@safety.ru](mailto:toxi@safety.ru)

Материал поступил в редакцию 21 апреля 2017 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2017, № 5, pp. 36–41.  
DOI: 10.24000/0409-2961-2017-5-36-41

Analytical Solution of the Problem of One-Dimensional Stationary Flowing of the Compressed Liquid and Gas

**Information about the Author**

S.V. Prokudin, Lead Specialist

A.S. Sofyin, Candidate of Technical Sciences, Department Head

A.A. Agapov, Candidate of Technical Sciences, Director of the Computational Analysis Center

STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

**Abstract**

Mathematical modeling of emergency emissions at gas wells blowing — an important forecasting phase of accidents consequences and calculation of quantitative risk indices at hazardous production facilities of oil and gas production. For settled blowing the calculation of parameters of medium movement along the well bore and emergency well flow rate shall be carried out by the solution of equation system including the equation of preservation of a number of movement in a differential form, the equation of continuity and the equation of a state. Analytical solutions of the above-stated system of the equations for cases of stationary flowing of gaseous, two-phase and liquid medium along the well section are obtained.

Presented dependences can be also applied for calculation of the parameters of stationary flowing along the pipelines.

Comparison was carried out of different tasks solutions with the use of ratios proposed in this work, and the direct numerical solution of the original system of equations. Comparison has shown satisfactory coherence of the obtained results.

The analytical dependencies presented in the Article allow to significantly simplify the solution of above-mentioned tasks. For carrying out calculations the authors of the Article have developed the computer program, which is currently included in the software TOXI+Risk 5 for an assessment of accidents consequences and calculation of quantitative indices of risk at hazardous production facilities.

**Key words:** mathematical model, one-dimensional stationary current, oil and gas production, spouting of the well, pipeline transport, assessment of consequences of accidents.

**References**

1. *Metodika analiza riska avarij na opasnykh proizvodstvennykh objektakh neftegazodobychi: ruk. po bezopasnosti: prikaz Rostehnadzora ot 17 avg. 2015 g. № 317* (Methods of Accidents Risk Analysis at Hazardous Production Facilities of Oil and Gas Production: Safety Guide: Decree of Rostehnadzor of August 17, 2015 № 317). Ser. 08. Iss. 28. Moscow: ZAO NTC PB, 2015. 48 p.

2. *STO Gazprom 2-2.3-400—2009. Metodika analiza riska dlya opasnykh proizvodstvennykh objektov gazodobyvajushihh predpriyatij OAO «Gazprom»* (STO Gazprom 2-2.3-400—2009. Methods of Risk Analysis for Hazardous Production Facilities of Gas Producing Enterprises of OAO Gazprom). Moscow: OOO «Gazprom jekspo», 2009.

3. Lure M.V. *Matematicheskoe modelirovanie processov truboprovodnogo transporta nefti, nefteproduktov i gaza: ucheb. posobie* (Mathematical Modeling of Processes of Oil, Oil Products and Gas Pipeline Transport: Textbook). Moscow: Centr RGU nefti i gaza (NIU) imeni I.M. Gubkina, 2012. 456 p.

4. Melnikov A.V. *Analiz jekspluatacii objektov dobychi i podgotovki gaza na mestorozhdenijah krajnego severa (na primere Bovanenkovskogo NGKM): dis. ... kand. tehn. nauk* (Analysis of Operation of Gas Production and Treatment Facilities at the Far North Gas Fields (on the Example of Bovanenkovsky Oil/Gas-Condensate Field): Thesis ... Candidate of Technical Sciences). Moscow, 2009. 166 p.

5. Samarskij A.A., Gulin A.V. *Chislennyye metody: ucheb. posobie dlya VUZov* (Numerical Methods: Testbook for Higher Education Institutions). Moscow: Nauka, 1989. 432 p.

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 751. 2016. DOI:10.1088/1742-6596/751/1/012022.

7. *Metodicheskie rekomendacii po provedeniju kolichestvennogo analiza riska avarij na opasnykh proizvodstvennykh objektakh magistralnykh nefteprovodov i nefteproduktoprovodov: ruk. po bezopasnosti: prikaz Rostehnadzora ot 17 iyunja 2016 g. № 228* (Methodical Recommendations on Conducting Quantitative Risk Analysis of Accidents at Hazardous Production Facilities of the Trunk Oil Pipelines and Oil Products Pipelines: Safety Guide, Decree of Rostehnadzor of June 17, 2016 № 228). Ser. 08. Iss. 24. Moscow: ZAO NTC PB, 2016. 122 p.

8. Malevanskij V.D., Sheberstov E.V. *Gidrodinamicheskie raschety rezhimov glushenija fontanov v nefjanyh i gazovyh skvazhinah* (Hydrodynamic Calculations of the Modes of Blowout Killing in Oil and Gas Wells). Moscow: Nedra, 1990. 246 p.

9. Sumskoj S.I., Agapov A.A., Sofin A.S., Sverchkov A.M., Egorov A.F. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2014. № 9. pp. 50–53.

10. Sumskoj S.I., Lisanov M.V., Agapov A.A., Sofin A.S., Sverchkov A.M., Egorov A.F. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2015. № 10. pp. 60–66.

11. *TOXI+Risk 5 dlya rascheta posledstvij avarij s vybrosom opasnykh veshhestv i ocenki riska* (TOXI+Risk 5 for Calculation of Accidents Consequences with Hazardous Substances Release and Risk Assessment). Available at: <https://toxi.ru/produkty/programmnyi-kompleks-toxirisk-5> (accessed: March 29, 2017).

**ФЕДЕРАЛЬНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА В ОБЛАСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ «ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ПОТРЕБЛЕНИИ ПРОДУКТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА»**

**СЕРИЯ 03. ВЫПУСК 88**



Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве и потреблении продуктов разделения воздуха» устанавливают требования, направленные на обеспечение промышленной безопасности, предупреждение аварий, случаев производственного травматизма на опасных производственных объектах производства и потребления продуктов разделения воздуха (кислород, азот, аргон, криптон, ксенон, неонгелиевая смесь) и их смесей.

Правила не применяются в отношении опасных производственных объектов, на которые распространяется действие Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при получении, транспортировании, использовании расплавов черных и цветных металлов и сплавов на основе этих расплавов», утвержденных приказом Ростехнадзора от 30.12.2013 № 656.

Вводятся в действие с 27 августа 2017 г.

**ЭТУ КНИГУ И ДРУГИЕ НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ МОЖНО ПРИОБРЕСТИ ПО АДРЕСУ:**

Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 21, а также заказать в отделе распространения по тел/факсам:

(495) 620-4753 (многоканальный), 620-4747, 620-4746. E-mail: [ornd@safety.ru](mailto:ornd@safety.ru).

Реклама