

УДК 621.72.621.532.3.656.08

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2016

О некоторых нестационарных процессах, возникающих в магистральных нефтепроводах

В. Н. Антипов,
Е. В. Налобина,
ООО «Энергия-2», г. Тюмень
И. Н. Налобин,
НАО «СибНАЦ», г. Тюмень

Аннотация

Проведен анализ методических и теоретических основ, заложенных в программный модуль ТОКСИ+гидроудар, который вошел в программный комплекс ТОКСИ+Risk. Показано, что одномерная модель течения нефти в магистральных нефтепроводах не может адекватно описывать явления, происходящие внутри трубопровода в случаях высокой степени нестационарности течения. Соответственно программный модуль ТОКСИ+гидроудар непригоден к практическому применению в случаях, подобных гидравлическому удару, а также при вычислениях количества нефти, участвующей в аварии при аварийной разгерметизации на линейной части магистральных нефтепроводов.

Ключевые слова: магистральный нефтепровод, гидравлический удар в трубопроводах, ТОКСИ+гидроудар, разгерметизация нефтепровода, аварийные утечки.

Содержание

Введение

1. Анализ графиков, представленных на рис. 1а и рис. 1б работы [1]
2. О корректности постановки задачи в программном продукте ТОКСИ+гидроудар
3. Явление гидравлического удара в трубопроводах
4. О корректности постановки некоторых инженерных задач
5. О применении законов классической механики
6. Еще раз об основном уравнении гидростатики

Заключение

Литература

Введение

Написанию настоящей работы послужила необходимость ответить на вопросы, поставленные авторами работы [1], а также дать более развернутый (чем в работе [2]) анализ методических основ, заложенных в программе ТОКСИ+гидроудар. В связи с этим следует отметить, что содержание аннотации статьи [1] *«Приведены аргументированные ответы на критические замечания, изложенные в рецензии на статью «Моделирование аварийных утечек на магистральных нефтепроводах, опубликованную в № 9 за 2014 г.»¹* не соответствует действительности. На самом деле ни на одно из замечаний не дано аргументированного ответа. Ответы носят голословный и эмоциональный характер, а большинство замечаний осталось вообще без рассмотрения. Вот некоторые из них: название

¹ Здесь и в дальнейшем будем выделять текст авторов статьи [1] полужирным курсивом и брать в кавычки.

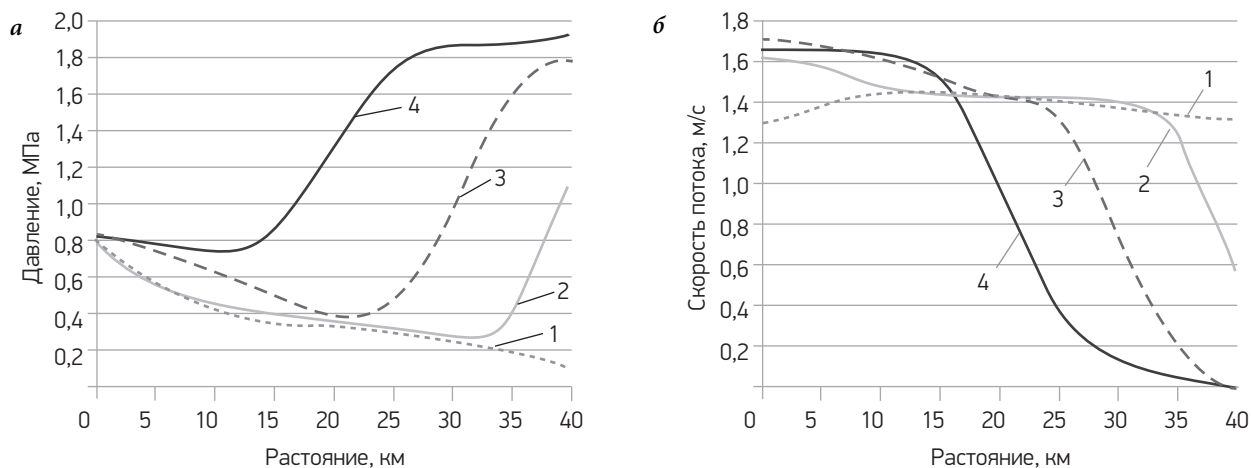


Рис. 1. Графики отображения результатов моделирования профиля давления (а) и профиля скорости потока (б) в МН в различные моменты времени: 1 — 59,99 с; 2 — 65,01 с; 3 — 72 с; 4 — 80 с [3]

статьи не соответствует ее содержанию; в названии статьи упоминается о моделировании, а в статье не приводится описания применяемой модели, нет четкой постановки математической задачи с приведением граничных и начальных условий, не дано физическое объяснение характера поведения расчетных кривых на рис. 1.

1. Анализ графиков, представленных на рис. 1а и рис. 1б работы [1]

Характер поведения всех кривых на рис. 1а и рис. 1б противоречит законам физики.

Кривые 2, 3 и 4 на обоих рисунках не должны претерпевать изменения (начальные участки этих кривых) до тех пор, пока не дойдет волна возмущения. То есть указанные кривые на начальном участке должны совпадать.

2. О корректности постановки задачи в программном продукте ТОКСИ+гидроудар

Авторы работы [1] отмечают: «Для определения массы утечек нефти использовали задачу с абстрактными исходными данными, показывающими возможность и неограниченность применения заложенной в программный продукт ТОКСИ+гидроудар математической модели для широкого диапазона значений исходных данных... Наконец, еще одно замечание, с которым катего-

рически нельзя согласиться, — утверждение о невозможности описать явление гидродинамического удара, используя дифференциальные уравнения... В настоящее время эта математическая модель вошла как приложение в руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов» (утв. Приказом Ростехнадзора от 7 ноября 2014 г. № 500)».

Отметим, что возможность применения отдельных положений упомянутого документа «Методические рекомендации...» требует особого обсуждения.

Касательно «возможности и неограниченности применения программного продукта ТОКСИ+гидроудар». Ниже будет показано, что любая модель обязательно имеет пределы применимости, обусловленные принятыми в модели допущениями.

3. Явление гидравлического удара в трубопроводах

Первоначально остановимся на явлении гидравлического удара. Явление гидравлического удара в трубопроводах — это быстропротекающее особое явление, и оно требует особых методов изучения. Многие крупные ученые XIX века — математики,

гидромеханики (как российские, так и зарубежные) пытались описать явление гидравлического удара с использованием известных дифференциальных уравнений гидромеханики. Однако никому не удалось это сделать, и не потому, что отсутствовали те или иные методы численных расчетов, а потому, что в самих дифференциальных уравнениях не заложено механизма действия явления гидравлического удара. И только великому русскому ученому Н.Е. Жуковскому удалось дать физическое объяснение этому явлению и получить основные зависимости, описывающие явление гидравлического удара в трубопроводах большой протяженности. При этом он не использовал дифференциальные уравнения гидродинамики. Формулы Н.Е. Жуковского получили экспериментальное подтверждение [4].

Начнем, казалось бы, издавека, с общих рассуждений. Но это необходимо, чтобы понять, что любая модель имеет границы применимости, то есть возможности любой модели не бесконечны. Любой реальный процесс (физический, химический, биологический и т.д.), как правило, очень сложный, зависящий от многих факторов (порой даже скрытых), из которых отдельные факторы являются определяющими. Влияние остальных факторов пренебрегается. Для математического описания процесса сначала создается физическая модель, которая применима для определенного класса задач. И лишь затем эта физическая модель описывается на языке математики, тем самым создается математическая модель.

Обратимся к истокам получения основных (дифференциальных) уравнений гидрогазодинамики — раздела механики сплошной среды.

В основе механики сплошной среды заложена модель сплошной среды. В этой модели принято основное допущение: физическое тело (вещество) в пределах занимаемого объема (пространства) непрерывным образом заполняет его. Это означает, что если в произвольно выбранной точке (x, y, z) выбрать бесконечно малый объем (часто его называют элементарным), то в этом объеме имеется достаточное количество молекул вещества, позволяющее вычислять такие физические параметры, как плотность вещества ρ , температура T , давление P , местная скорость движения u и т.д. В действительности же между молекулами существуют «пустоты». При переходе от одной точки (x, y, z) трехмерного

пространства к другой (x_r, y_r, z_r) мы обязательно попадем на элементарную жидкую частицу, для которой значения физических величин T, P, ρ, u могут быть иными. Значения этих величин могут также изменяться со временем. Модель сплошной среды предполагает, что физические величины являются непрерывными функциями координат и времени, а значит, дифференцируемыми [5]. Модель сплошной среды позволяет применять математический аппарат дифференциального исчисления.

Если в рассматриваемом объеме движущейся жидкости в любой (произвольной) точке (x, y, z) в любой фиксированный момент времени t выделить некий элементарный объем dV , в общем случае произвольной формы, то в соответствии с принципом Даламбера сумма всех массовых и поверхностных сил (являются векторными величинами), включая и силы инерции, действующих на эту элементарную частицу, равна нулю. Полученное векторное уравнение в проекции на оси декартовой системы координат x, y, z дают три дифференциальных уравнения движения. В результате такого подхода получаются известные дифференциальные уравнения движения Стокса для невязкой (идеальной) жидкости, уравнения Навье — Стокса для вязкой (реальной) жидкости при ламинарном режиме течения, уравнения Навье — Стокса — Рейнольдса для реальной жидкости при турбулентном режиме течения. Следует отметить, что в механике жидкости и газа под термином жидкость (флюид) понимается как капельная (практически несжимаемая), так и газообразная (существенно сжимаемая) жидкость.

Применяя к рассматриваемой элементарной частице закон сохранения массы: в любой фиксированный момент времени разница в количествах втекающей и вытекающей жидкости через боковую поверхность элементарной частицы возможна лишь за счет изменения плотности жидкости внутри самого объема элементарной частицы. При этом предполагается отсутствие источников и стоков внутри рассматриваемого элементарного объема. В результате получается дифференциальное уравнение, которое именуется как уравнение неразрывности или уравнение сплошности потока.

К дифференциальным уравнениям движения и неразрывности необходимо добавить уравнение состояния, уравнение термодинамического про-

цесса и уравнения корреляции турбулентных пульсаций (при турбулентном режиме течения), а также начальные и граничные условия.

Подчеркнем еще раз, что вывод дифференциальных уравнений механики жидкости и газа (уравнений гидрогазодинамики) возможен только при условии, когда функции $P(x, y, z, t)$, $\rho(x, y, z, t)$, и $u(x, y, z, t)$ являются непрерывными (гладкими), а значит, дифференцируемыми.

В случае гидравлического удара в трубопроводе функции $P(x, y, z, t)$, $\rho(x, y, z, t)$, $u(x, y, z, t)$ терпят разрыв непрерывности на фронте ударной волны, а сам фронт ударной волны перемещается вдоль трубопровода с большой скоростью. Именно поэтому модель сплошной среды «не работает», и, следовательно, применять дифференциальные уравнения гидродинамики в случае гидравлического удара в трубопроводе нельзя. В этом можно легко убедиться, если попытаться вывести дифференциальные уравнения движения и неразрывности для случая гидравлического удара по аналогии с вышеприведенным выводом уравнений гидрогазодинамики. В самом деле, если рассмотреть элементарную жидкую частицу в виде цилиндрика, один из торцов которого совпадает с фронтом ударной волны, на которой физические параметры P , ρ , u терпят разрыв непрерывности первого рода, а значит, невозможно взять частные производные указанных функций.

Как следует из работ [1] и [6], в программном документе ТОКСИ+гидроудар используется одномерная модель течения, представляющая собой систему дифференциальных уравнений:

- уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho w)}{\partial x}; \quad (1)$$

- уравнения сохранения импульса

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho w^2 + P) - \lambda(\text{Re}) \cdot \frac{\rho w^2}{2D} + \rho g \frac{dz}{dx}; \quad (2)$$

- связи давления и плотности (уравнения состояния)

$$P - P_0 = c^2(\rho - \rho_0), \quad (3)$$

где t — время, с;

x — расстояние вдоль трубопровода от его начала, м;

P , ρ , w — осредненные по сечению значения: давление, плотность и скорость нефти;

λ — коэффициент гидравлических сопротивлений по длине трубопровода;

g — ускорение силы тяжести, м/с²;

c — скорость распространения звука в нефти, м/с;

z — нивелирная (высотная) отметка точек трассы трубопровода, м.

Для вычисления значения коэффициента λ в работе [6] рекомендуется использовать формулу Кольбука — Уайта.

В общем случае значение коэффициента λ зависит не только от числа Рейнольдса, но и от эквивалентной шероховатости внутренней поверхности труб.

Следует отметить, что уравнение (3) не является уравнением состояния. Известно [7, 8], что скорость распространения малых возмущений в сжимаемых средах, т. е. скорость звука, определяется через производную давления от плотности по формуле

$$c = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}, \quad (4)$$

которая получается из равенства (3), устремив в нем $\Delta\rho$ к нулю.

Уравнение состояния системы материальных точек связывает макроскопические параметры системы с постоянным числом частиц (т. е. заданной массы вещества) в состоянии термодинамического равновесия, которое записывается в форме неявной функции

$$f(P, V, T) = 0 \quad (5)$$

или в виде

$$f(P, \rho, T) = 0, \quad (6)$$

где P — давление, Па;

V — занимаемый объем, м³;

ρ — плотность нефти, кг/м³;

T — абсолютная температура, К.

Задать уравнение состояния означает конкретизировать вид функции f . Для капельных жидкостей в качестве уравнения состояния используются выражения:

$$\beta_p = \frac{\Delta V}{V} \frac{1}{\Delta P}, \beta_T = \frac{\Delta V}{V} \frac{1}{\Delta T}, \quad (7)$$

где β_p — объемный коэффициент сжатия (при постоянной температуре), м²/Н;

β_T — объемный коэффициент температурного расширения (при постоянном давлении), $1/K$;

V — первоначальный объем нефти, m^3 ;

ΔV — изменение объема нефти, обусловленное изменением давления (при постоянной температуре), либо изменение объема, обусловленное изменением температуры (при постоянном давлении), m^3 ;

ΔP — изменение давления, Pa ;

ΔT — изменение температуры нефти, K .

Значения коэффициентов β_p и β_T для каждой капельной жидкости определяется экспериментальным путем в лабораторных условиях. Среднее статистическое значение β_p для товарной нефти различных нефтяных месторождений обычно принимается равным $7,1 \cdot 10^{-10} Pa^{-1}$.

Ввиду малого значения коэффициента β_p в большинстве случаев сжимаемостью нефти пренебрегают, т. е. нефть рассматривают как несжимаемую среду. Однако в отдельных случаях сжимаемостью нефти пренебрегать нельзя. К числу таких случаев следует отнести явление гидравлического удара и явление истечения нефти при аварийной разгерметизации трубопровода гильотинного типа [9].

В основе одномерной модели течения жидкости в трубопроводах лежит понятие средней скорости течения. Средняя скорость — это условная скорость, фиктивная. Эта скорость определяется, если известен закон изменения местной скорости движения жидкости в пределах сечения трубопровода по формуле

$$w = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R u(r) dr. \quad (8)$$

Следует обратить внимание, что одномерная модель, применяемая в трубной гидравлике, хорошо «работает» при установившемся движении. Но как только движение становится неустановившемся, одномерная модель дает сбои. Чем сильнее выражена нестационарность течения, тем большую погрешность дает эта модель. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо обосновать возможность применения одномерной модели. Возникает вопрос: в чем же причина такого положения? А причина кроется в том, что второй член, входящий в правую часть уравнения (2) и называемый

формулой Дарси Вейсбаха, справедлив только для установившихся течений. Входящий в эту формулу коэффициент гидравлических сопротивлений по длине λ нельзя вычислять по известным эмпирическим зависимостям, так как все они получены при установившемся движении [10, 11]. С физической точки зрения такое положение можно объяснить тем, что при движении жидкости потери энергии происходят в объеме самой жидкости. Эта энергия расходуется на преодоление сил трения, которые возникают между отдельными слоями жидкости, движущимися с разной скоростью. А это возможно только при наличии градиента местной скорости. Одномерная модель при неустановившемся движении не учитывает градиента скорости в пределах сечения потока.

Известно [12], что *при установившемся* турбулентном движении касательное напряжение, представляющее собой силу трения, возникающую между слоями жидкости, отнесенную к единице площади трущихся слоев, определяется выражением

$$\tau_w = (\mu + A) \frac{du}{dn}, \quad (9)$$

где τ_w — касательное напряжение, N/m^2 ;

μ — коэффициент динамической (молекулярной) вязкости жидкости, $Pa \cdot s$;

A — коэффициент турбулентной динамической вязкости, $Pa \cdot s$;

$\frac{du}{dn}$ — градиент местной скорости движения в трубопроводах круглого сечения (направление нормали n совпадает с направлением радиуса r), c^{-1} .

Если нет относительного движения между отдельными слоями жидкости (при этом градиент скорости равен нулю), то и силы трения между такими слоями не возникают, а значит, и не расходуется энергия на трение.

При неустановившемся движении жидкости в трубопроводе невозможно построить профиль местной скорости u , а значит, вычислить градиент скорости, определить среднюю по сечению скорость w как средне-интегральное значение местной скорости по сечению трубы с использованием формулы (8).

4. О корректности постановки некоторых инженерных задач

Авторы работы [1] приводят результаты расчетов по методике ТОКСИ+гидроудар для вновь поставленной задачи с исходными данными: «*Рассматривается течение нефти (плотность 840 кг/м^3 ; скорость звука в жидкости 1240 м/с ; вязкость жидкости $1 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$) в стальном трубопроводе (внутренний диаметр 1 м , длина 40 км ; толщина стенки $0,08 \text{ м}$; начальная точка трубопровода расположена на высоте 40 м , конечная $= 0 \text{ м}$; шероховатость внутренней поверхности трубопровода $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, давление в начале трубопровода $0,8 \text{ МПа}$, в конце — $0,1 \text{ МПа}$). Нефть поступает в начало трубопровода из бесконечной емкости. В конце трубопровода располагается задвижка, которая закрывается мгновенно через 60 с после установления стационарного режима течения нефти в трубопроводе*».

Прежде всего проведем анализ приведенных исходных данных поставленной выше задачи. Отсутствуют данные по упругости материала стенки трубы и по модулю упругости нефти. Не приводится значение давления насыщения нефти при температуре перекачки. Не указана глубина заложения трубопровода в грунт. Для магистральных нефтепроводов глубина заложения труб должна быть не менее $0,8 \text{ м}$ над верхней образующей трубы. В задаче не указано расположение линейных задвижек вдоль трассы нефтепровода. В начале нефтепровода в обязательном порядке должна быть установлена отсекающая задвижка. Для магистральных нефтепроводов расстояние между линейными отсекающими задвижками не должно превышать 30 км . В условиях приведенной выше задачи задается значение скорости звука в нефти, равное 1240 м/с , а в последующей задаче, приведенной в той же самой работе [1], принимается значение скорости 1300 м/с . Возникает вопрос: на каком основании так вольно задают значение скорости звука в нефти? Вообще говоря, значение скорости звука для каждой жидкости рассчитывается, исходя из ее упругих свойств. Без задания отсутствующих исходных данных невозможно корректное решение задачи.

Особо следует отметить, что условие бесконечной емкости делает задачу вообще бессмысленной. В самом деле, что будет, когда фронт волны гидрав-

лического удара дойдет до начала трубопровода, где установлена бесконечная емкость (значит, имеющая бесконечный объем и бесконечные размеры)? Что будет дальше? Как описать это событие в рамках одномерной модели, описываемой уравнениями (1) — (3)?

5. О применении законов классической механики

В работе [1] авторы задают вопрос и требуют пояснения: «*Однако требует более детального пояснения используемый в рецензии метод расчета массы вылившейся нефти. В частности рассмотрим следующий тезис рецензентов: “второе предельное состояние характеризуется тем, что истечение полностью прекратится и система придет в гидростатическое состояние... Следует отметить, что во втором предельном состоянии весь нефтепровод длиной 40 км будет заполнен нефтью”. Так, несложно оценить, что при возникновении аварийного отверстия разгерметизации на расстоянии 100 м от начала трубопровода в самой нижней точке его сечения над отверстием разгерметизации будет располагаться около 66 т нефти. Неужели в этом случае система находится в гидростатическом равновесии?*»

Отвечаем. Да, система будет находиться в гидростатическом равновесии, несмотря на то что над отверстием разгерметизации будет располагаться около 66 тонн нефти. Более того, если даже рассмотреть случай расположения аварийного отверстия на расстоянии 1000 м от начала нефтепровода, над которым будет располагаться свыше 650 тонн нефти, весь нефтепровод будет заполнен нефтью, включая и начальный участок длиной 1000 м . Причем площадь сечения отверстия не играет роли — это может быть и свищ, и трещина средних размеров, и гильотинный порыв. Здесь действуют законы природы, законы физики. Это пример так называемого парадокса гидростатики. В курсах «Гидравлика» парадокс гидростатики обычно иллюстрируют следующим примером (рис. 2).

Рассматриваются три сосуда, заполненные водой на одну и ту же высоту h . Сосуды имеют одинаковую площадь дна, а форма сосудов разная, как показано на рис. 3. В сосудах находится разное количество воды. Вопрос: в каком из приведенных

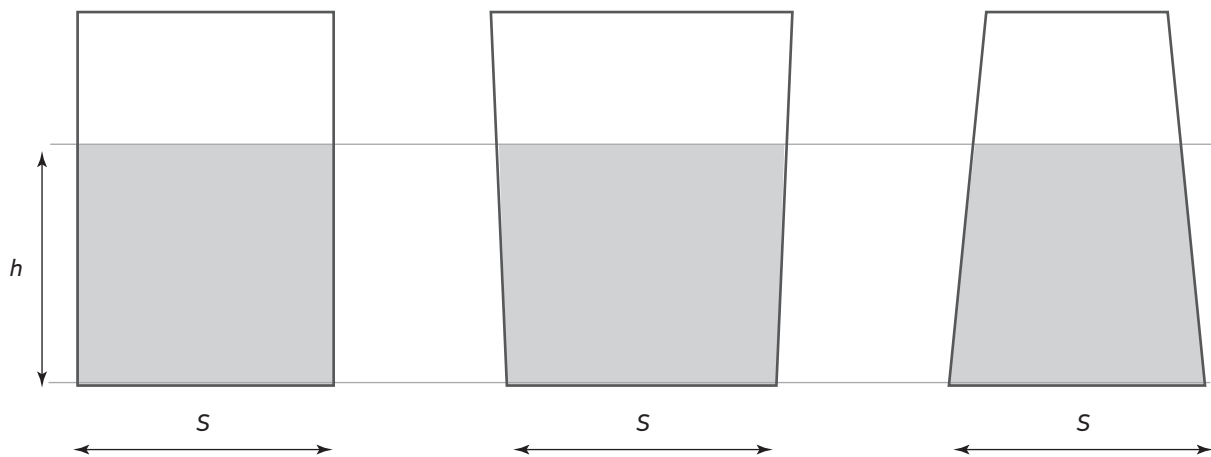


Рис. 2. Парадокс гидростатики

сосудов сила давления воды на дно сосуда больше? Так как вес воды во всех сосудах разный, то, казалось бы, что сила давления воды в первом сосуде наибольшая, а в третьем сосуде — наименьшая. В действительности же оказывается, что силы давления жидкости на дно во всех сосудах имеют одно и то же значение. В самом деле, сила определяется как произведение давления на площадь. Площади во всех сосудах равные, но и давление на дно во всех сосудах одинаковое, определяемое в соответствии с законом гидростатики $P = \rho gh$.

Возвратимся к рассматриваемому аварийному участку нефтепровода. Поскольку аварийное отверстие будет находиться в затопленной части (трубопровод уложен в грунт), то давление слева от отверстия равно давлению справа от отверстия. Согласно основному уравнению гидростатики эти давления равны

$$P_1 + \Delta z \rho g = P_{\text{атм}} + \rho_{\text{см}} g h_{\text{то}}, \quad (10)$$

где P_1 — абсолютное давление в начале участка трубопровода (предполагается, что находящаяся в на-



Рис. 3. Эксперимент, подтверждающий эффект парадокса гидростатики

чале трубопровода отсекающая задвижка закрыта), Па;

$P_{\text{атм}}$ — атмосферное давление, Па;

Δz — разница геодезических отметок начала участка трубопровода и места расположения аварийного отверстия, м;

ρ — плотность нефти, кг/м³;

$\rho_{\text{см}}$ — плотность нефтегрунтовой смеси, находящейся над аварийным отверстием, кг/м³;

$h_{\text{го}}$ — высота нефтегрунтовой смеси над аварийным отверстием с внешней стороны трубопровода, т. е. со стороны атмосферы, м;

g — ускорение свободного падения, м/с².

Из выражения (10) можно вычислить значение P_1 и сравнить его со значением давления насыщения нефти при заданной температуре. Если P_1 окажется меньше значения давления насыщения нефти, то начнется процесс образования пара и появления паровой пробки.

Здесь важно, чтобы давление P_1 было больше давления насыщенных паров товарной нефти, удовлетворяющей ГОСТ Р 51858-2002 [13]. Для рассматриваемого примера это условие выполняется. Последнее вытекает из уравнения (10), в котором для случая нахождения аварийного отверстия на расстоянии 100 м от начала нефтепровода значение $\Delta z = (40 \text{ м} / 40\,000 \text{ м}) 100 \text{ м} = 0,1 \text{ м}$.

Трубопровод — тоже емкость, представляющая собой цилиндр большой протяженности, в котором масса заключенной в нем нефти не влияет на происходящие в нем процессы. Определяющим фактором может являться только давление над отверстием, которое определяется как давление столба жидкости высотой $h = \Delta z$ над аварийным отверстием, определяемой разницей геодезических высот начала участка и места нахождения аварийного отверстия. Для случая места расположения аварийного отверстия на расстоянии 1000 м от начала трубопровода высота столба нефти над отверстием составляет всего 1 м ($\Delta z = (40 \text{ м} / 40\,000 \text{ м}) \times 1000 \text{ м} = 1 \text{ м}$). В соответствии с уравнением (10) даже в этом случае нефть останется в трубопроводе (т. е. нефтепровод будет полностью заполнен нефтью) несмотря на то, что количество нефти над отверстием составляет более 650 тонн. В самом деле, истечения нефти через отверстие не будет происходить, т. к. давление над отверстием с внутренней стороны нефтепрово-

да будет уравниваться атмосферным давлением и давлением столба нефтегрунтовой смеси с наружной стороны аварийного отверстия.

Для большей убедительности мы провели следующий эксперимент (см. рис. 3). Наполнили цилиндрический прозрачный сосуд обычной водой (для наглядности воду подкрасили марганцовкой) и поместили вверх дном в прозрачную емкость, частично заполненную такой же подкрашенной водой. В результате установилось гидростатическое равновесие (см. рис. 3а). Вода из сосуда не вылилась. Вода в сосуде удерживается в состоянии абсолютного покоя благодаря атмосферному давлению воздуха, действующему на свободной поверхности воды в емкости. Высота сосуда составляла около 0,20 м. Если даже сосуд первоначально не полностью заполнить водой, то в результате такого эксперимента в перевернутом вверх дном сосуде образуется воздушная подушка (см. рис. 3б), которая не влияет на состояние равновесия (покоя).

Подобный эксперимент может провести каждый, причем в любых условиях. Для этого достаточно взять простую, например, пол-литровую бутылку, заполнить ее водой из водопроводного крана и опустить ее горлышком вниз в пол-литровую стеклянную банку, частично заполненную водой. Причем опустить бутылку надо так, чтобы горлышко было опущено ниже свободной поверхности воды в банке. Вода из бутылки не будет выливаться. Но стоит приподнять бутылку вверх так, чтобы ее горлышко оказалось чуть-чуть выше свободной поверхности воды в банке, часть воды из бутылки выльется, а вместо нее в бутылку попадет воздух. Как только горлышко бутылки окажется вновь скрытым водой в банке, истечение воды прекратится. Вновь установится гидростатическое равновесие.

6. Еще раз об основном уравнении гидростатики

В работе [1] дается неверное умозаключение: «...согласно гидродинамической модели рецензии одному и тому же стационарному градиенту давления в трубопроводе соответствует два режима движения среды: транспортирования с ненулевой скоростью и покоя. Последнее состояние покоя в условиях действия ненулевой силы — фактическое нарушение первого закона Ньютона, который гласит,

что тело покоится (или движется с постоянной скоростью) при нулевой сумме всех действующих на него сил. Таким образом, предложенная модель выходит за рамки механики...». По этому вопросу поясняем, что все законы Ньютона, а также все аксиомы динамики классической механики формулируются только по отношению к инерциальным системам отсчета [8]. **Инерциальная система отсчета (ИСО)** — система отсчета, в которой все свободные тела движутся прямолинейно и равномерно (т. е. с постоянной скоростью) или покоятся. Именно только в этом случае, в случае инерциальной системы отсчета, движение, также как и покой, рассматривается как равновесное состояние. Явление гидравлического удара — неустановившийся быстропотекающий процесс, не удовлетворяет требованиям ИСО, это во-первых. Во-вторых, фронт ударной волны разделяет весь трубопровод на две части [2] — первая, в пределах которой изменения параметров потока соответствуют стационарному (штатному) режиму перекачки, вторая часть — область повышенного давления, в которой скорость движения жидкости равна нулю. Последнее не является основанием считать, что наступило гидростатическое равновесие. Гидростатическое равновесие — это состояние жидкости, находящейся в покое сколько угодно длительное время. Жидкость в возмущенной области нефтепровода находится в сжатом (подобно сжатой пружине), напряженном состоянии, способна в дальнейшем совершать работу расширения. Причем размеры возмущенной области увеличиваются по мере продвижения фронта ударной волны. Это временное (промежуточное) состояние, как отдельный временной этап явления гидравлического удара, поэтому ни о какой гидростатике в этой области говорить нельзя, хотя скорость движения и равна нулю. Кстати, сжатое состояние нефти и приведет в дальнейшем к появлению обратной волны (волны понижения давления) гидравлического удара. Здесь уместно вновь обратиться к рис. 1, заимствованному из работы [3], и повторно поставить вопрос перед авторами указанной работы: почему кривые изменения давления на рис. 1а для разных моментов времени не совпадают в невозмущенной области нефтепровода? Чем объяснить различие

характера кривых поведения скорости потока в невозмущенной области трубопровода, соответствующих разным моментам времени? Как объяснить изменение значения скорости потока нефти в начале трубопровода для разных моментов времени (кривые 1, 2, 3 и 4 на графике рис. 1б)? В невозмущенной области трубопровода значения всех гидродинамических параметров изменяются в соответствии со штатным режимом эксплуатации. В невозмущенной области трубопровод еще даже «не почувствовал», что где-то произошло аварийное событие.

Кстати, значение скорости движения нефти в трубопроводе, равное 1,3 м/с, в работе [2] заимствовано из графика рис. 1, взятого из работы [3]. Авторы работы [1] сами обнаружили свою же ошибку в расчетах значения скорости. Новое значение скорости составило 2,02 м/с (вместо 1,3 м/с).

Следует отметить, что если дифференциальные уравнения гидродинамики, применяемые при рассмотрении задачи, не имеют силы (т.е. непригодны к применению), то уже неважно, какие методы численных решений этих дифференциальных уравнений используются.

Заключение

В результате проведенного анализа методических и теоретических основ, заложенных в программном модуле ТОКСИ+гидроудар, можно сделать вывод о том, что одномерная модель течения нефти в магистральных нефтепроводах не может адекватно описывать явления, происходящие внутри трубопровода в случаях высокой степени нестационарности течения. Соответственно программный модуль ТОКСИ+гидроудар не пригоден к практическому применению в случаях, подобных гидравлическому удару, а также при вычислениях количества нефти, участвующего в аварии при аварийной разгерметизации на линейной части магистральных нефтепроводов. Вычисленное по программному модулю ТОКСИ+гидроудар количество нефти, вылившейся из нефтепровода при аварийной разгерметизации его линейной части, может на несколько порядков превышать реально возможное значение с учетом физических свойств нефти и конкретного профиля трассы трубопровода.

Литература

1. 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.
2. Антипов 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.
3. 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.
4. Жуковский Н.Е. Полное собрание сочинений. Т. VII. Гидравлика. М.: Л.: ОНТИ, 1936. С. 58—146.
5. Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа. Т. 1. М.: Наука, 1968. 440 с.
6. Моделирование переходных и аварийных процессов в магистральных нефтепроводах с помощью метода С.К. Годунова / С.А. Губин, Т.В. Губина, С.И. Сумской и др. // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 10. С. 66—71.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 733 с.
8. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. I. Механика. М.: Физматлит: Изд-во МФТИ, 2005. 560 с.
9. Антипов В.Н., Налобина Е.В., Налобин И.Н. Некоторые аспекты нестационарных процессов при гильотинном разрыве на магистральном нефтепроводе // Проблемы анализа риска. 2007. Т. 4. № 3. С. 51—57.
10. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1970. 216 с.
11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970. 904 с.

12. Идельчик И.М. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.
13. ГОСТ Р 51858-2002. Товарная нефть.

Сведения об авторах

Антипов Владимир Наумович: заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, директор ООО «Энергия-2»

Количество публикаций: более 300

Область научных интересов: анализ риска на объектах нефтегазового комплекса

Контактная информация:

Адрес: 623023, г. Тюмень, ул. Одесская, д. 9, оф. 612

Тел.: +7 (345) 252-18-44

E-mail: antipevvn72@mail.ru

Налобина Елена Владимировна: кандидат технических наук, заместитель директора ООО «Энергия-2»

Количество публикаций: 19

Область научных интересов: анализ риска на объектах нефтегазового комплекса

Контактная информация:

Адрес: 623023, г. Тюмень, ул. Одесская, д. 9, оф. 612

Тел.: +7 (345) 252-18-44

E-mail: nalobina-elena@yandex.ru

Налобин Илья Николаевич: кандидат технических наук, помощник ГИПа НАО «СибНАЦ».

Количество публикаций: 11

Область научных интересов: анализ риска на объектах нефтегазового комплекса

Контактная информация:

Адрес: 625039, г. Тюмень, ул. Харьковская, д. 59, к. А

Тел.: +7 (345) 268-98-25

E-mail: 9612113947@list.ru