

Моделирование переходных и аварийных процессов в магистральных нефтепроводах с помощью метода С.К. Годунова



С.А. Губин,
д-р физ.-мат. наук,
проф.



Т.В. Губина,
канд. физ.-мат. наук,
доцент



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



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

НИЯУ «МИФИ»

ЗАО НТЦ ПБ

Приведен численный метод решения системы одномерных нестационарных уравнений, описывающих движение нефти в магистральных нефтепроводах в предположении изотермичности процесса. Метод предназначен для моделирования переходных процессов в магистральных нефтепроводах в нормальном и аварийном режимах, в том числе при разгерметизации трубопровода.

The Article presents the numerical method of solving the system of one-dimensional non-stationary equations describing oil movement in the oil trunk pipelines with the assumption on process isothermality. The method is aimed at modeling the transitional processes in the oil trunk pipelines in the normal and emergency modes, including at pipeline depressurization.

Ключевые слова: метод С.К. Годунова, переходные процессы, магистральные трубопроводы.

В процессе эксплуатации магистральных нефтепроводов (МН) и иных протяженных трубопроводных систем, по которым транспортируют жидкие продукты, при остановке насосных станций, переключении режимов перекачки, перекрытии запорной арматуры возможны переходные (нестационарные) процессы. В ходе этих процессов могут формироваться волны роста давления — волны сжатия (ВС) и уменьшения давления — волны разгрузки (ВР). Волны сжатия, распространяясь вдоль трубопровода, могут привести к перегрузкам по давлению (гидроудару) и, как следствие, к разрыву трубы или образованию опасных дефектов. Волны разгрузки могут быть причиной недопустимого понижения давления, способного нарушить сплошность потока, что в свою очередь вызовет ряд негативных процессов: усиление ударных волн, повышение механических вибраций элементов системы [1, 2].

Так, гидроудар послужил одной из причин аварии с разрывом трубопровода на нефтебазе «Шесхарис» (г. Новороссийск) и загрязнением акватории порта [3].

В действующих нормативных документах на проектирование трубопроводов нефти и нефтепро-

дуктов (СНиП 2.05.06—85* и др.) отсутствуют четкие методики, рекомендации, правила и требования к проектным решениям, направленным на обеспечение механической безопасности (прочности) трубопроводной системы при переходных процессах. С одной стороны, современный подход к анализу опасностей переходных процессов связан с моделированием их источников и расчетами волн давления при течении слабосжимаемой жидкости в трубопроводных системах путем численного решения систем уравнений гидрогазодинамики, например [1, 2].

С другой стороны, на тех же уравнениях гидрогазодинамики, но с другими граничными и начальными условиями, основаны решения задач расчета массы аварийного выброса.

В данной работе предлагается развитие единого подхода к применению методов численного моделирования не только для решения проблем прочностного расчета трубопровода, но и промышленной безопасности при оценке риска аварий.

Основную опасность при авариях на МН представляют выбросы нефти, которые, попадая в окружающую среду, загрязняют ее. Нефтяные разливы могут представлять и пожаровзрывоопасность [3–12].

Один из главных факторов, определяющих масштабы загрязнения и пожаровзрывоопасности, — количество нефти, вытекшей из МН. Эта величина зависит от ряда факторов [13–15]:

- технологических параметров трубопровода (диаметр, давление), регламента эксплуатации МН;
- рельефа (профиля) трассы;
- характера разрушения (размер и форма дефектных отверстий) трубопровода;
- оперативности действий по предотвращению и локализации аварии.

Очевидно, что при анализе и оценке последствий аварий на МН необходимо корректно учесть перечисленные выше факторы. При этом очень важно достаточно точно описывать и движение среды внутри самого МН, поскольку именно моделирование течения нефти — основа для определения скорости, а следовательно, и объема выброса. К сожалению, в последние годы появилась тенденция к упрощенному и зачастую ошибочному моделированию ситуаций на МН [13, 14].

Моделированию течений в трубопроводах посвящено большое количество работ, которые стали основой для создания ряда конкретных программных продуктов, позволяющих моделировать функционирование трубопроводов в различных режимах, в том числе с учетом систем защиты от превышения давления.

Обычно при моделировании течений в МН используют метод характеристик [1], который строится на предположении о постоянстве скорости распространения возмущений в трубопроводе. Там же, где эта скорость перестает быть постоянной, использование метода характеристик затруднительно. Существуют работы [16], в которых для расчета течений в МН применяют конечно-разностные методы. В них производные в дифференциальных уравнениях заменяют разностными аналогами, обычными разностями. Получаемые таким образом арифметические выражения легко могут быть решены. Эти методы более универсальны по сравнению с методом характеристик. Однако сложность при их практической реализации состоит в том, что не все свойства исходных дифференциальных уравнений сохраняются в используемых арифметических выражениях. Поэтому требуется соблюдение сложных процедур для обеспечения даже приблизительного совпадения численных решений с точными.

Метод С.К. Годунова [17] обладает более высокой универсальностью по сравнению с методом характеристик. Он позволяет естественным образом, без существенных усложнений переносить в численные решения свойства точных решений. До недавнего времени основным недостатком этого метода считалось сравнительно длительное время проведения расчетов. Но современные алгоритмические и аппаратные решения сделали этот метод более доступ-

ным. И на сегодня можно утверждать, что время расчета задач по методу С.К. Годунова, как правило, не является ограничивающим фактором.

В данной работе приведены модель и численный метод расчета решений сохранения массы импульса энергии в рамках подхода С.К. Годунова, позволяющие предсказать поведение сложной трубопроводной системы в различных режимах ее эксплуатации. Предлагаемый метод основан на численном решении нестационарной системы одномерных уравнений гидродинамики для слабосжимаемой изотермической среды.

Рассматриваемый подход полностью соответствует положениям методического документа [15] и его можно использовать:

- на стадии проектирования МН в целях обоснования систем защиты от превышения давления и минимизации объемов выбросов, например за счет оптимального размещения задвижек на трассе;

- для анализа последствий уже произошедших аварий и определения нанесенного ущерба;

- для анализа риска МН [5–7], например в целях разработки мероприятий по ликвидации и локализации аварийных ситуаций, обоснования проектных решений, компенсирующих отступления от действующих требований [8], при обосновании минимальных безопасных расстояний [9].

Данный подход может быть распространен и на другие трубопроводные системы, например продуктопроводы ШФЛУ [10], аммиакопроводы [11], использоваться для исследования нестационарных переходных процессов, и в частности гидроударов в МН, с последующим анализом разрыва трубопровода и расчетом массы выброса нефти.

Ниже представлены основные соотношения рассматриваемого подхода на примере решения типичных задач.

Постановка задачи

Рассматривается следующий сценарий аварии.

На МН в момент времени t_0 на расстоянии l_0 образуется отверстие площадью S_0 , что приведет к выходу нефти из МН, падению давления на месте аварии и распространению ВР. Волны разгрузки снижают давление по всей трассе и, достигнув начала МН, способствуют падению давления на выходе нагнетающего насоса, что влечет либо остановку насоса либо изменение режима его работы. До момента остановки или изменения режима работы насоса в трубе, после циркуляции ВС и ВР, может установиться режим стационарного течения, характеризующийся меньшим давлением по всей трубе, большим расходом потока до места разгерметизации и меньшим после него. При этом скорость истечения нефти в окружающую среду будет падать от максимального значения до нового стационарного уровня.

Если насосы в начале и в конце МН начинают останавливаться, то от начала МН будет распростра-

няться ВР, а от конца — ВС. Эти волны останавливают движение нефти в МН. Если к месту разрушения МН первой приходит ВР, то скорость истечения нефти уменьшается, а если — ВС, то произойдет некоторое увеличение скорости выброса, но потом скорость истечения нефти снова уменьшится.

Далее перекрывают задвижки на МН. При этом объемы вытекания нефти уменьшаются.

После полного отсечения задвижками аварийного участка МН в результате циркуляции волн в нем устанавливается профиль давления, соответствующий перепаду высот на трассе, с учетом возможного движения нефти к месту истечения.

Истечение нефти прекращается после спада давления на месте аварии и вытекания в самотечном режиме остатков нефти из изолированного участка.

Уравнения движения

В изотермическом приближении движение жидкости в трубе описывается системой следующих уравнений:

неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x}, \quad (1)$$

сохранения импульса

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} - \lambda(\text{Re}) \frac{|u|u\rho}{2d} - \rho g \beta, \quad (2)$$

связи давления и плотности (уравнение состояния)

$$p - p_0 = c^2(\rho - \rho_0), \quad (3)$$

где ρ , p , u — осредненные по сечению плотность, давление и скорость движения нефти; t — время; x — расстояние от начала МН; $\lambda(\text{Re})$ — коэффициент трения, зависящий от числа Рейнольдса Re ; g — ускорение силы тяжести; β — синус угла наклона трассы, который определяется по высотным отметкам МН $h(x)$; ρ_0 — плотность нефти при давлении p_0 , равном 0,1 МПа.

В рассматриваемой модели учтены следующие факторы:

конвективное движение (первые слагаемые в правых частях (1) и (2));

появление и циркуляция волн при разгерметизации МН, остановке (пуске) насосов, закрытии задвижек (второе слагаемое в правой части (2));

наличие трения о стенки трубы (третье слагаемое в правой части (2));

действие на поток силы тяжести при прохождении трассы нефтепровода по местности со сложным рельефом (четвертое слагаемое в правой части (2)).

В модели учитывают реальные характеристики действующего на МН оборудования (трубы, насосы, задвижки).

Уравнения (1)–(3) дополняются начальными и граничными условиями.

Для определения $\lambda(\text{Re})$ использовали зависимость Коулбрука — Уайта [15, 18], связывающую

коэффициент трения λ с числом Рейнольдса Re и характеристиками трубопровода (диаметр d и шероховатость k):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71d} \right]. \quad (4)$$

На месте разрушения скорость истечения нефти U_0 из МН с давлением p и плотностью ρ в среду с давлением P_0 определяется из интеграла Бернулли:

$$U_0 = \sqrt{2 \frac{p - P_0}{\rho}}. \quad (5)$$

Соответственно, поток массы F через отверстие S_0 задается выражением

$$F = \alpha S_0 U_0 \rho, \quad (6)$$

где α — коэффициент, учитывающий трение потока о кромку отверстия и уменьшение площади сечения свободной струи при ускорении жидкости (принимается равным 0,6).

Численное решение задачи

Система уравнений (1)–(3), (5) решалась численно, с использованием метода С.К. Годунова [17]. Метод С.К. Годунова относится к классу интегральных разностных методов, в которых основной элемент — расчет потоков (массы, импульса и энергии) через границы определенных элементарных объемов (разностных ячеек). Суммируя все потоки по границам за определенный интервал времени, определяли значения соответствующих величин спустя этот интервал времени. Участок трубопровода разбивали на ячейки размером Δx , состояние в которых в любой момент времени $n\Delta t$ (давление p_i^n , плотность ρ_i^n , скорость жидкости u_i^n и скорость звука c_i^n) считалось постоянным по всему объему ячейки. Численный метод решения задачи состоит из трех этапов (расщепление по физическим процессам). Сначала моделировали течение нефти без учета разгерметизации, на этапе II добавляли действие силы трения и силы тяжести, а на этапе III рассматривали процесс истечения из разрушенного МН.

Этап I. Решается система уравнений, в которой отсутствуют слагаемые, отвечающие за действие вязких сил и сил тяжести. На этом этапе определяют потоки массы и импульса в i -ю ячейку, после чего в ней находится новое состояние. Потоки вычисляются с помощью решения задачи о распаде разрыва. Поскольку нефть в оговоренных обстоятельствах можно считать мало сжимаемой, решение задачи о распаде разрыва на границе двух ячеек допустимо в звуковом приближении. Записав уравнения для волн на правой и левой границах, получим следующую систему для нахождения параметров на границе ячеек:

$$\begin{cases} p_{\text{пп}} - p_{i+1}^n = \rho_{i+1}^n c_{i+1}^n (u_{\text{пп}} - u_{i+1}^n); \\ p_{\text{пп}} - p_i^n = -\rho_i^n c_i^n (u_{\text{пп}} - u_i^n); \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} p_{\text{л}} - p_i^n = \rho_i^n c_i^n (u_{\text{л}} - u_i^n); \\ p_{\text{л}} - p_{i-1}^n = -\rho_{i-1}^n c_{i-1}^n (u_{\text{л}} - u_{i-1}^n), \end{cases} \quad (8)$$

где индекс «пр» означает принадлежность параметров к правой, а индекс «л» — к левой границе i -й ячейки.

Системы уравнений (7) и (8) однозначно определяют параметры потока на левой и правой границах i -й ячейки:

$$\begin{cases} u_{\text{пр}} = \frac{p_i^n - p_{i+1}^n + \rho_{i+1}^n c_{i+1}^n u_{i+1}^n + \rho_i^n c_i^n u_i^n}{\rho_{i+1}^n c_{i+1}^n + \rho_i^n c_i^n}; \\ p_{\text{пр}} = p_{i+1}^n + \rho_{i+1}^n c_{i+1}^n \frac{p_i^n - p_{i+1}^n + \rho_i^n c_i^n (u_{i+1}^n - u_i^n)}{\rho_{i+1}^n c_{i+1}^n + \rho_i^n c_i^n}; \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} u_{\text{л}} = \frac{p_{i-1}^n - p_i^n + \rho_i^n c_i^n u_i^n + \rho_{i-1}^n c_{i-1}^n u_{i-1}^n}{\rho_i^n c_i^n + \rho_{i-1}^n c_{i-1}^n}; \\ p_{\text{л}} = p_i^n + \rho_i^n c_i^n \frac{p_{i-1}^n - p_i^n + \rho_{i-1}^n c_{i-1}^n (u_i^n - u_{i-1}^n)}{\rho_i^n c_i^n + \rho_{i-1}^n c_{i-1}^n}. \end{cases} \quad (10)$$

С использованием полученных по (9)–(10) значений давлений $p_{\text{л}}$ и $p_{\text{пр}}$ по (3) рассчитывают значения плотностей $\rho_{\text{л}}$ и $\rho_{\text{пр}}$ на границах ячейки.

Зная $p_{\text{л}}$, $\rho_{\text{л}}$, $u_{\text{л}}$ и $p_{\text{пр}}$, $\rho_{\text{пр}}$, $u_{\text{пр}}$, можно получить суммарные потоки массы Φ_{mi} и импульса Φ_{pi} в каждую ячейку:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{mi} &= u_{\text{л}i} \rho_{\text{л}i} - u_{\text{пр}i} \rho_{\text{пр}i}; \\ \Phi_{pi} &= u_{\text{л}i}^2 \rho_{\text{л}i} + p_{\text{л}i} - u_{\text{пр}i}^2 \rho_{\text{пр}i} - p_{\text{пр}i}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Окончательные значения параметров в i -й ячейке на $(n + 1)$ -м временном слое рассчитывают следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \rho_i^{n+1} &= \frac{m_i^{n+1}}{\Delta x} = \frac{m_i^n + \Phi_{mi} \Delta t}{\Delta x}; \\ u_i^{n+1} &= \frac{R_i^{n+1}}{m_i^{n+1}} = \frac{R_i^n + \Phi_{pi} \Delta t}{m_i^{n+1}}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где m_i^{n+1} и m_i^n — массы, а R_i^{n+1} и R_i^n — импульсы в i -й ячейке на $(n + 1)$ -м и n -м временных слоях.

Давление в i -й ячейке на n -м временном слое определяется по (3).

Этап II. Учитывают действие сил трения и гравитации. Скорость в i -й ячейке пересчитывают в соответствии с формулой

$$u_i^{n+1} = u_i^{n+1} - \lambda (\text{Re}_i^{n+1}) \frac{|u_i^{n+1}| u_i^{n+1}}{2d} \Delta t - g \beta \Delta t. \quad (13)$$

Этап III. Моделируют истечение нефти из МН через отверстие разрушения. Это происходит путем изъятия из соответствующей ячейки сетки массы жидкости:

$$\Delta M = \alpha S_0 \rho_i U_0 \Delta t. \quad (14)$$

Предложенный метод был реализован в виде вычислительной программы для персональной ЭВМ.

Для обоснования применимости данного подхода были решены несколько аналитических задач:

о стационарном движении в горизонтальной трубе при наличии трения о стенки;

о стационарном движении в трубе в отсутствие трения о стенки при наличии перепада высот на трассе;

о заполнении трубы нефтью при одном закрытом конце.

Полученные для этих тестовых задач численные решения с высокой степенью точности совпали с аналитическими решениями.

В заключение краткого описания схемы С.К. Годунова следует отметить, что она позволяет естественным образом учитывать следующие конструктивные и эксплуатационные особенности, не приведенные в данной работе:

- реальные характеристики насосов;
- реальные условия срабатывания задвижек (изменение во времени просвета с учетом конструктивных особенностей);
- наличие отверстий разрушения, клапанов, вантузов;
- изменение диаметра трубы по трассе;
- наличие ветвлений трубопровода любой конфигурации;

образование газовых полостей и взаимодействие потока нефти с ними;

последовательную перекачку разных нефтей.

Необходимо отметить, что в данной статье рассматривается изотермическое течение слабосжимаемой жидкости, однако подход С.К. Годунова может быть обобщен на случаи многофазных потоков с теплообменом, а также более сложных уравнений состояния среды. Описанный вариант численного метода расчета характеризуется первым порядком точности, однако без особого труда точность может быть повышена [19]. Наконец, излагаемый метод легко переносится на неравномерные сетки.

Пример тестового расчета

С помощью предложенного подхода была решена модельная задача об аварии на МН со следующими характеристиками. Длина МН 100 км, диаметр 500 мм, шероховатость внутренней поверхности 100 мкм. На входе МН установлен насос с характеристикой «напор — расход»: $P - 0,8 = 4,74 - 23,6 Q^2$ (давление P , МПа, расход Q , м³/с). Проходит МН по пересеченной местности: первые 50 км идет подъем от нулевой отметки до 100 м, затем на 50-м км — спуск до нулевой отметки. На обоих концах МН размещены мгновенно срабатывающие задвижки. Давление в конце МН 1,3 МПа.

Рассмотрим следующий модельный сценарий аварии:

изначально нефть в МН находится в состоянии покоя;

происходят пуск насоса и открытие задвижек на входе и выходе МН;

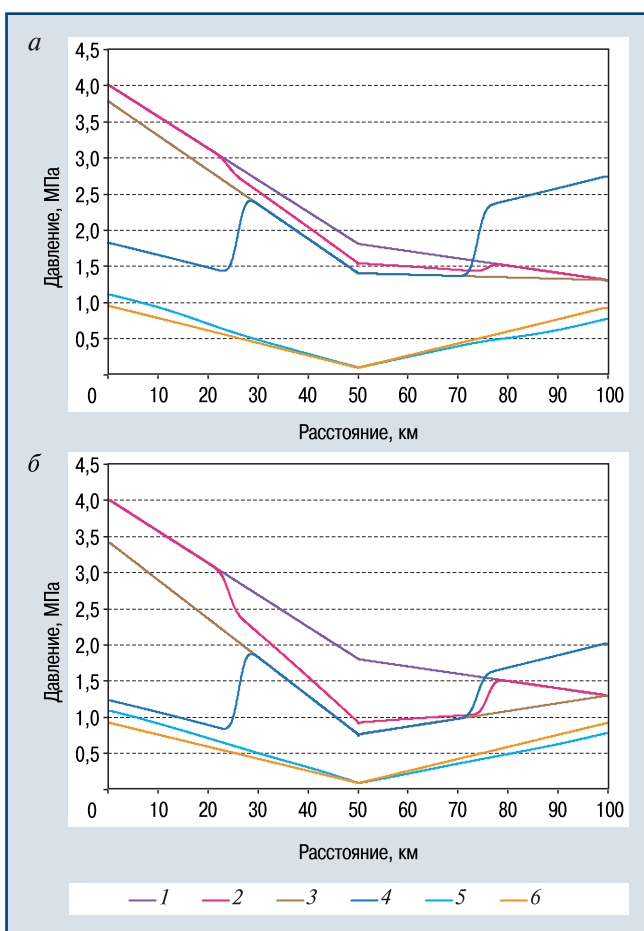
через 600 с после пуска насоса на расстоянии 50 км (верхняя точка трассы) МН разрушается — образуется отверстие площадью S_0 ;

через 600 с после разрушения МН насос останавливается и задвижки перекрывают вход и выход на МН.

Рассмотрены два варианта разрушения, когда S_0 составляет 1 и 5 % площади сечения МН ($1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ и $9,81 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$).

Приняты следующие свойства нефти: вязкость $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, скорость звука 1300 м/с, плотность 860 кг/м³, давление насыщенных паров 100 кПа.

На рис. 1 приведено распределение давления для двух вариантов аварии в моменты времени: 580 с (за 20 с до разрыва), 620 с (через 20 с после разрыва), 1180 с (за 20 с до перекрытия задвижек), 1220 с (через 20 с после перекрытия задвижек), 1800 и 3600 с после начала перекачки. Для 580 с показаны профили давления установившегося течения, при этом скорость движения нефти по МН составляет 1,3 м/с.



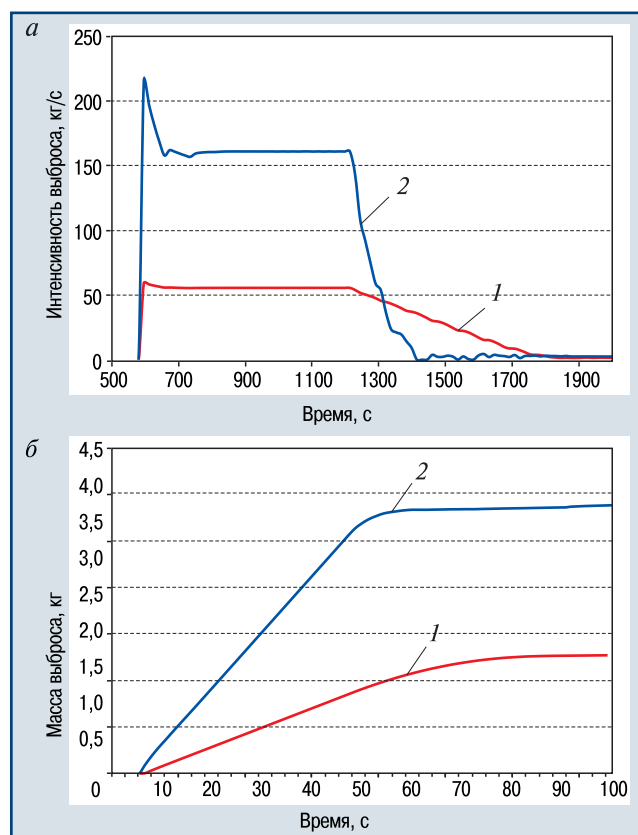
▲ Рис. 1. Распределение давления в трубопроводе в различные моменты времени при образовании отверстия разгерметизации 1 % (а) и 5 % (б) площади сечения:

1 – 580 с; 2 – 620 с; 3 – 1180 с; 4 – 1220 с; 5 – 1800 с; 6 – 3600 с

После разгерметизации МН от места разгерметизации распространяются ВР (см. рис. 1 для момента времени 620 с). Поскольку время, прошедшее после

разгерметизации, составляет 20 с, а волны давления в нефти распространяются со скоростью звука (1300 м/с), то обе волны проходят расстояние по 26 км. Именно в этом интервале (от 24 до 76 км трассы) заметно понижение давления, за пределы этого интервала возмущения еще не успели добежать, и давление там соответствует профилю стационарного течения.

До закрытия задвижек проходит сравнительно большой интервал времени, и поэтому в МН успевает установиться стационарный режим течения, который показан на рис. 1 для 1180 с. Из сравнения давления для 580 и 1180 с видно, что стационарный его профиль при истечении из разрушенного МН расположен ниже профиля рабочего давления. Зависимость интенсивности выброса от времени приведена на рис. 2, а, из которого видно, что стационарная скорость истечения достигается примерно через 100 с, т.е. за время возврата волн от концов МН. При стационарном режиме истечения скорость движения нефти до места разрушения возрастает до 1,39 и 1,52 м/с, а после разрыва снижается до 1,06 и 0,57 м/с, при разгерметизации соответственно 1 и 5 % площади поперечного сечения. Давление на входе МН также снижается. Давление на выходе осталось прежним (1,3 МПа), что является следствием выбранного способа задания граничных условий — постоянство давления на выходе.



▲ Рис. 2. Зависимость интенсивности выброса (а) и массы выброса (б) от времени для различных площадей разрушения:

1 – 1 %; 2 – 5 %

После срабатывания задвижек на входе и выходе МН от входа распространяется ВР, а от выхода — ВС. Это видно на рис. 1 в момент времени 1220 с.

После отсечения аварийного участка и сброса давления в нем система приходит в состояние покоя и давление в трубе становится равным гидростатическому давлению столба нефти (см. рис. 1 для 3600 с).

На рис. 2, б приведена зависимость количества вытекшей нефти от времени. Из рис. 2 видно, что при большем разрушении МН в окружающую среду попадает около 116 т нефти, а при меньшем — около 51 т.

Таким образом, в работе предложен подход для расчета основных параметров нестационарных (переходных и аварийных) процессов в магистральных нефтепроводах (давление, расход, плотность), основанный на численном решении уравнений гидрогазодинамики методом С.К. Годунова. В расчетах учитываются реальные характеристики трубопровода (в том числе насосов, задвижек, отводов, предохранительных клапанов, профиля трассы), распределение давления и расхода жидкости вдоль него, потери на трение, а также возможность возникновения самотечных участков при снижении давления на линейном участке ниже давления насыщенных паров.

Список литературы

1. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. — М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. — 336 с.
2. Арбузов Н.С. Теория и расчет систем защиты морских нефтеналивных терминалов от гидравлических ударов. Дис... канд. техн. наук. — М., 2010. — 202 с.
3. Гуцин В.В. Авария на трубопроводе № 9 нефтебазы «Шесхарис» АО «Черномортранснефть»// Безопасность труда в промышленности. — 1998. — № 1. — С. 8–9.
4. Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта/ М.В. Лисанов, А.В. Савина, Д.В. Дегтярев, Е.А. Самусева// Безопасность труда в промышленности. — 2010. — № 7. — С. 16–22.
5. Оценка риска аварий на линейной части магистральных нефтепроводов/ М.В. Лисанов, А.С. Печеркин, В.И. Сидоров и др.// Безопасность труда в промышленности. — 1998. — № 9. — С. 50–56.
6. Оценка риска аварий на магистральных нефтепроводах КТК-Р и БТС/ Ю.А. Дадонов, М.В. Лисанов, А.И. Гражданкин и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2002. — № 6. — С. 2–6.
7. Анализ риска аварий на нефтепроводных системах БТС и МН «Дружба»/ М.В. Лисанов, А.И. Гражданкин,

А.В. Пчельников и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2006. — № 1. — С. 34–40.

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

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

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

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

12. Оценка риска аварий на объектах хранения и переработки нефти и нефтепродуктов/ А.В. Пчельников, А.И. Гражданкин, И.А. Кручинина и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2004. — № 6. — С. 33–37.

13. Сумской С.И., Пчельников А.В., Лисанов М.В. О расчете объемов разливов опасных жидкостей при авариях на объектах трубопроводного транспорта// Безопасность труда в промышленности. — 2006. — № 2. — С. 48–53.

14. Сумской С.И., Лисанов М.В. О корректности расчетных моделей аварийных разливов нефти и нефтепродуктов// Проблемы анализа риска. — 2008. — Т. 5. — № 2. — С. 36–41.

15. Жулина С.А., Лисанов М.В., Савина А.В. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах// Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 1. — С. 50–55.

16. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов/ Под ред. В.Е. Селезнева. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: МАКС Пресс, 2009.

17. Годунов С.К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики// Матем. сб. — 1959. — Т. 47. — С. 271–306.

18. Миркин А.З., Усиньш В.В. Трубопроводные системы. — М: Химия, 1991. — 256 с.

19. Численные методы решения уравнений с частными производными. Ч. 1./ С.А. Губин, И.В. Маклашова, С.И. Сумской, В.А. Шаргатов. — М.: НИЯУ МИФИ, 2012. — 256 с.

risk@safety.ru