

УДК 622.692.4.07

А.С. Дидковская¹, e-mail: didkovskaya.a@gubkin.ru

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (Москва, Россия).

Метод расчета переходных процессов, сопровождаемых образованием парогазовых полостей

В статье представлена обобщенная теория переходных процессов в нефтепроводах, предназначенная для расчета нестационарных течений жидкости с учетом возможности снижения давления в волне разрежения до упругости ее насыщенных паров и начала фазового перехода жидкости в пар. В отличие от классической теории, предполагающей полное заполнение всех сечений трубопровода жидкостью, в данной теории допускается возникновение в трубопроводе пустот, заполненных парами транспортируемой жидкости. Ключевым моментом предлагаемого обобщения является положение, согласно которому для описания течения жидкости в нефтепроводе на разных его участках используются разные системы уравнений. Так, на участках полного заполнения используются классические уравнения Н.Е. Жуковского и И.А. Чарного для напорного течения, а на участках частичного заполнения – уравнения безнапорного течения, характерные для описания русловых течений, т. е. процессов течения жидкости в реках и открытых каналах. При этом в сечениях нефтепровода, в которых давление снижается до упругости насыщенных паров, происходит сопряжение параметров течения, входящих в уравнения обеих моделей, в соответствии с законами механики. В рамках теории развит метод конечных элементов, родственный методу С.А. Годунова для распада произвольного разрыва, проведена компьютерная валидация предлагаемого метода. Действенность предложенного метода доказана с помощью примера расчета распространения волны давления, обусловленной перекрытием задвижки в конечном сечении трубопровода, в нефтепроводе с большим перепадом высот профиля. Расчеты позволили выявить ранее не зафиксированные эффекты, вызываемые разрывом сплошности столба транспортируемой жидкости. Учет таких явлений имеет большое практическое значение с точки зрения безопасности эксплуатации трубопроводов, в особенности со значительным перепадом высот.

Ключевые слова: нефтепровод, переходный процесс, нестационарное течение, гидравлический удар, упругий запас, разрыв сплошности потока, парогазовая полость, моделирование, численный расчет.

.....

А.С. Дидковская¹, e-mail: didkovskaya.a@gubkin.ru

¹ Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education “Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)” (Moscow, Russia).

Designing of Transient Processes accompanied by Gas-Vapor Cavitation

The article presents the generalized theory of transient processes in pipelines aimed at designing unsteady fluid flows considering a possible pressure reduction in the depression-type wave to its saturated vapor pressure and onset of liquid-vapor transition. Unlike the classical theory suggesting complete fluid fill-up of all flow passages, the above theory allows cavitation filled-up with vapors of cargo fluid. A key point of the theory proposed is its provision which uses different systems of equations in different sections of a pipeline to describe the fluid flow in it. Thus, in the sections of complete fill-up the classical equation of N.Ye. Zhukovskiy and I.A. Charnoy are used for enforced flow, while in the sections of partial fill-up – the equations of voluntary flow used to describe streamflows, i. e. processes of fluid flow in rivers and open channels. Besides, in the oil pipeline flow passages in which the pressure lowered reaches saturated vapor pressure there occurs conjugation of flow parameters contained in the equations of both models as set by the laws of mechanics. In addition, the finite element method allied to the S.A. Godunov’s method on breakdown of arbitrary discontinuities has been developed and computer validation of the method proposed has been carried out. Efficiency of the method under consideration has been proved by the design example of pressure-wave travel resulting from closure of the gate valve at the final flow passage in the oil pipeline with a considerable elevation drop. Computations have made it possible to identify the effects unregistered previously, which are caused by discontinuity of cargo fluid column.

To register such effects is of high practical value from the operation safety reasons of pipelines, particularly of those with a considerable elevation drop.

Keywords: oil pipeline, transient process, unsteady flow, hydraulic shock, elastic resource, flow discontinuity, gas-vapor cavity, simulation, numerical calculation.

Уравнения течения на напорных участках

Решение задач, связанных с переходными процессами в трубопроводе, основано на совместном решении уравнений неразрывности и изменения количества движения для двух неизвестных функций – давления $p(x, t)$, и скорости движения жидкости $v(x, t)$, зависящих от координаты x и времени t :

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho \cdot S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot S)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial t} + \frac{\partial(p + \rho \cdot v^2)}{\partial x} = -\lambda(v, d) \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho \cdot v \cdot |v|}{2} - \rho \cdot g \cdot \frac{dz}{dx}, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости; $\lambda(v, d)$ – коэффициент гидравлического сопротивления; g – ускорение силы тяжести; d – внутренний диаметр трубопровода; $S = \pi \cdot d^2 / 4$ – площадь его поперечного сечения. Система уравнений (1) была предложена классиками отечественной механики Н.Е. Жуковским [1] и И.А. Чарным [2] и использовалась многими учеными для решения прикладных задач, связанных с движением жидкости в трубопроводах.

Согласно методу конечных элементов С.К. Годунова [3] численного решения системы уравнений (1) плоскость переменных (x, t) разбивается прямоугольной сеткой со сторонами ячейки Δx и Δt , причем шаг сетки выбирается таким образом, чтобы выполнялось условие сходимости разностной схемы Куранта – Фридрихса – Леви: $\Delta x \geq c \cdot \Delta t$ (примем $\Delta x = 2 \cdot c \cdot \Delta t$). Если проинтегрировать уравнения системы (1) по площади расчетной ячейки $AA'B'B$ (рис. 1), получится система уравнений

$$\begin{cases} p_{x,t+\Delta t} = p_{x,t} - \frac{c^2}{S_0} [(\rho \cdot v \cdot S)_{BB'} - (\rho \cdot v \cdot S)_{AA'}] \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}, \\ v_{x,t+\Delta t} = \frac{(\rho \cdot v)_{x,t} - [(p + \rho \cdot v^2)_{BB'} - (p + \rho \cdot v^2)_{AA'}] \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} - \varphi_{x,t} \cdot \Delta t}{\rho_{x,t+\Delta t}}, \end{cases} \quad (2)$$

где функция $\varphi_{x,t} = \rho_{x,t} [\lambda(v_{x,t}, d) \cdot v_{x,t} \cdot |v_{x,t}| / (2 \cdot d) + g \cdot \sin(\alpha_{x,t})]$; $c = 1 / \sqrt{\rho_{атм} \cdot d_{атм} / (E \cdot \delta) + \rho_{атм} / K_p}$ – скорость распространения волн в трубопроводе по Н.Е. Жуковскому; $\sin(\alpha) = dz/dx$ – синус угла α наклона трубопровода к линии горизонта. Кроме того, при составлении системы (2) плотность жидкости $\rho_{x,t}$ записана с учетом поправки на давление p ,

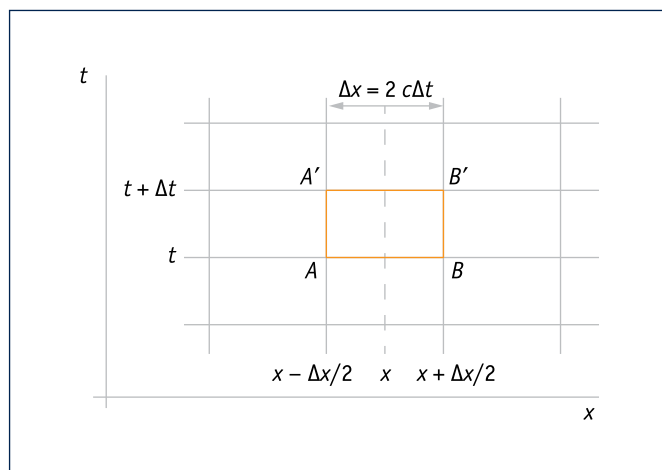


Рис. 1. Результат моделирования методом сквозного счета
Fig. 1. Simulation results by the shock capturing method

т. е. $\rho_{x,t} = \rho_0 + \Delta p_{x,t} = \rho_0 [1 + (p_{x,t} - p_0) / K_p]$, где K_p – модуль упругости жидкости, а площадь сечения трубопровода $S_{x,t}$ записана с учетом поправки на расширение под действием давления: $S_{x,t} = S_0 + \Delta S_{x,t} = S_0 [1 + d_0(p_{x,t} - p_0) / (E \cdot \delta)]$, где E – модуль упругости стали; δ – толщина стенки трубы.

Для определения неизвестных значений параметров течения на боковых гранях AA' и BB' счетной ячейки $AA'B'B$ (рис. 1) можно использовать метод характеристик [4]. Так, для определения параметров на грани AA' получаем:

$$\begin{cases} p_{AA'} = \frac{J_{x-\Delta x,t}^+ + J_{x,t}^-}{2}, \\ v_{AA'} = \frac{J_{x-\Delta x,t}^+ - J_{x,t}^-}{2c \cdot \rho_{AA'}}, \end{cases} \quad (3)$$

для определения параметров на грани BB' :

$$\begin{cases} p_{BB'} = \frac{J_{x,t}^+ + J_{x+\Delta x,t}^-}{2}, \\ v_{BB'} = \frac{J_{x,t}^+ - J_{x+\Delta x,t}^-}{2c \cdot \rho_{BB'}}. \end{cases} \quad (4)$$

При этом $J_m^+ = p_m + (\rho \cdot c \cdot v)_m - 0,5\varphi_m \cdot \Delta x$; $J_m^- = p_m - (\rho \cdot c \cdot v)_m + 0,5\varphi_m \cdot \Delta x$.

Ссылка для цитирования (for citation):

Дидковская А.С. Метод расчета переходных процессов, сопровождаемых образованием парогазовых полостей // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2019. № 6. С. 72–76.

Didkovskaya A.S. Designing of Transient Processes accompanied by Gas-Vapor Cavitation. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2019;6:72–76. (In Russ.)

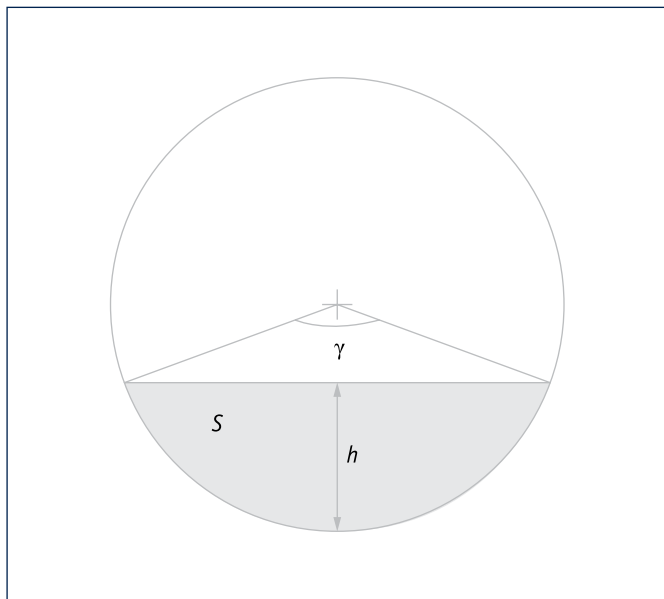


Рис. 2. Сечение трубопровода на самотечном участке
Fig. 2. Flow passage in the gravity line

Уравнения (3) – (4) дополняют систему уравнений (2), и все вместе составляют замкнутую систему уравнений для решения задач переходных процессов на участках напорного течения, т. е. в тех сечениях трубопровода, в которых давление не уменьшается до упругости насыщенных паров транспортируемой жидкости p_y и жидкость не переходит в парогазовую фазу.

Уравнения течения на безнапорных участках

Если в переходном процессе давление в сечении магистрального трубопровода опускается до давления упругости насыщенных паров перекачиваемой жидкости p_y , то возникает разрыв сплошности потока. На каком-то участке возникает так называемое самотечное (безнапорное) течение, при котором жидкость движется неполным сечением, а над ее поверхностью образуется парогазовая смесь.

Для самотечных течений вместо системы уравнений (1) нужно использовать другую систему, а именно:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho \cdot S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot S)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot S)}{\partial t} + \frac{\partial(p \cdot S + \rho \cdot v^2 \cdot S)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot S \cdot h_c)}{\partial x} = \\ = -\frac{\rho \cdot g \cdot S \cdot v \cdot |v|}{R_r \cdot C_w^2} - \rho \cdot g \cdot S \cdot \sin(\alpha), \end{cases} \quad (5)$$

где h_c – глубина центра тяжести самотечной части сечения трубопровода.

Уравнение неразрывности остается таким же, как для напорных сечений, с той лишь разницей, что в случае расчета самотечного участка $S \neq \text{const}$. Левая часть уравнения движения (второе уравнение системы (5)) дополняется слагае-

мым, отражающим действие движущей силы Буссинеска. Эта сила связана с тем, что свободная поверхность жидкости не параллельна нижней образующей трубы [5]. Правая часть уравнения движения складывается из силы трения жидкости о внутреннюю поверхность трубопровода (для безнапорных течений коэффициент Шези C_w играет ту же роль, что и коэффициент λ для напорных) и скатывающей составляющей силы тяжести. Для вычисления коэффициента Шези C_w обычно используют формулу Павловского: $C_w = R_r^{1/6}/0,012$, где R_r – гидравлический радиус, определяемый через внутренний диаметр трубопровода d и центральный угол γ , (рис. 2), как $R_r = 0,25d \cdot (1 - \sin(\gamma)/\gamma)$.

Для определения функции $Y(\gamma) = S \cdot h_c = \int_0^\gamma S \cdot dh$, входящей в уравнение движущей силы Буссинеска, площадь сечения S , занятого жидкостью, можно выразить через центральный угол γ : $S = 0,0125 \cdot d^2 \cdot (\gamma - \sin(\gamma))$. Уровень жидкости h , в сечении трубопровода определяется как $h = 0,5d \cdot (1 - \cos(\gamma/2))$, т. е. $dh = 0,25d \cdot \sin(\gamma/2) \cdot d\gamma$. В результате интегрирования получаем $Y(\gamma) = 0,0625 \cdot d^3 \cdot (-\gamma \cdot \cos(\gamma/2) + 2\sin(\gamma/2) - 2/3 \cdot \sin^3(\gamma/2))$.

Учитывая это, уравнения системы (5) путем интегрирования по площади расчетной ячейки $AA'B'B$ (рис. 1) также могут быть приведены к конечно-разностному виду:

$$\begin{cases} p_{x,t+\Delta t} = p_y, \\ S_{x,t+\Delta t} = \frac{1}{\rho_{x,t+\Delta t}} \cdot \left[(\rho \cdot S)_{x,t} - [(\rho \cdot v \cdot S)_{BB'} - (\rho \cdot v \cdot S)_{AA'}] \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \right], \\ v_{x,t+\Delta t} = \frac{1}{(\rho \cdot S)_{x,t+\Delta t}} \cdot \left[(\rho \cdot v \cdot S)_{x,t} - \Phi_{x,t} \cdot \Delta t - \right. \\ \left. - [(\rho \cdot S)_{BB'} - (\rho \cdot S)_{AA'} + (\rho \cdot v^2 \cdot S)_{BB'} - (\rho \cdot v^2 \cdot S)_{AA'} + \right. \\ \left. + g \cdot \cos \alpha_{x,t} \cdot ((\rho \cdot Y)_{BB'} - (\rho \cdot Y)_{AA'}) \right] \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\Phi_{x,t} = \rho_{x,t} \cdot g \cdot S_{x,t} \cdot \left[\frac{v_{x,t} \cdot |v_{x,t}|}{R_{rx,t} \cdot C_{wx,t}^2} + \sin \alpha_{x,t} \right]$.

Для определения значений параметров на боковых гранях AA' и BB' самотечной ячейки $AA'B'B$ нужны замыкающие уравнения. Они могут быть записаны на основании решения задачи о распаде произвольного разрыва. Для области жидкости, охватывающей разрыв и заключенной между сечениями $x_1(t)$ и $x_2(t)$, справедливы законы сохранения массы и изменения количества движения:

$$\begin{cases} \frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\int_{x_1(t)}^{x_2(t)} \rho \cdot S \cdot dx \right] = 0, \\ \frac{d}{dt} \left[\int_{x_1(t)}^{x_2(t)} \rho \cdot v \cdot S \cdot dx \right] = \sum F_x^{\text{внеш}}, \end{cases} \quad (8)$$

где $\sum F_x^{\text{внеш}}$ – сумма всех внешних сил, действующих на выделенную область жидкости, в проекции на ось x .

Введем значение x_p координаты границы разрыва течения жидкости. Тогда скорость разрыва будет определяться как $D = dx_p/dt$. Параметры потока жидкости слева от разрыва будем обозначать надстрочным знаком «-», справа от разрыва – надстрочным знаком «+». Внешними силами для области жидкости, заключенной между сечениями $x_1(t)$ и $x_2(t)$, являются силы давления и тяжести. Проекция разности сил давления на торцах элемента жидкости, охватывающего разрыв, равна $(p^- - p^+) \cdot S$. Разность сил тяжести на границе контакта ячеек возникает за счет различия уровней жидкости в ячейках. Ее проекция на ось x зависит от взаимного расположения частично заполненной и полностью заполненной ячеек. Если по ходу движения жидкости полностью заполненная ячейка следует за частично заполненной, проекция разности сил тяжести равна

$$\left(\rho^+ \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \int_0^\gamma S \cdot dh - \rho^- \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \int_0^{2\pi} S \cdot dh \right).$$

Если же частично заполненная ячейка следует за полностью заполненной, то

$$\left(\rho^+ \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \int_0^{2\pi} S \cdot dh - \rho^- \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \int_0^\gamma S \cdot dh \right).$$

В результате дифференцирования системы уравнений (8) с учетом уравнения неразрывности потока и при условии $\rho^- \cong \rho^+$ получаем:

$$\begin{cases} S^- \cdot (v^- - D) = S^+ \cdot (v^+ - D), \\ S^- \cdot v^- \cdot (v^- - D) - S^+ \cdot v^+ \cdot (v^+ - D) = \\ = \frac{(p^+ - p^-) \cdot S}{\rho} \pm g \cdot \cos \alpha \cdot \int_\gamma^{2\pi} S \cdot dh, \end{cases} \quad (9)$$

где знак «+» перед последним слагаемым ставится при расположении самотечной ячейки по ходу движения жидкости ниже ячейки, заполненной полностью, знак «-» – при противоположном расположении.

Функция $Y^1(\gamma) = \int_\gamma^{2\pi} S \cdot dh$, входящая в (9), рассчитывается как:

$$Y^1(\gamma) = 0,0625 \cdot d^3 \cdot (\pi + \gamma \cdot \cos(\gamma/2) - 2 \sin(\gamma/2) + 2/3 \cdot \sin^3(\gamma/2)).$$

Дополнением к системе (9) являются уравнения на характеристиках, записанные со стороны полностью заполненной ячейки, т. е. $p^+ - p^+ \cdot c \cdot v^+ = J_{x+\Delta x}^-$, если заполненная ячейка следует по потоку за самотечной, и $p^- + p^- \cdot c \cdot v^- = J_{x-\Delta x}^-$ при другом расположении.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Проиллюстрируем реализацию алгоритмов расчета переходных режимов работы трубопроводов на примере гидравлического удара, вызванного закрытием задвижки на участке нефтепровода. Рассмотрим относительно короткий (для быстроты счета) участок нефтепровода длиной

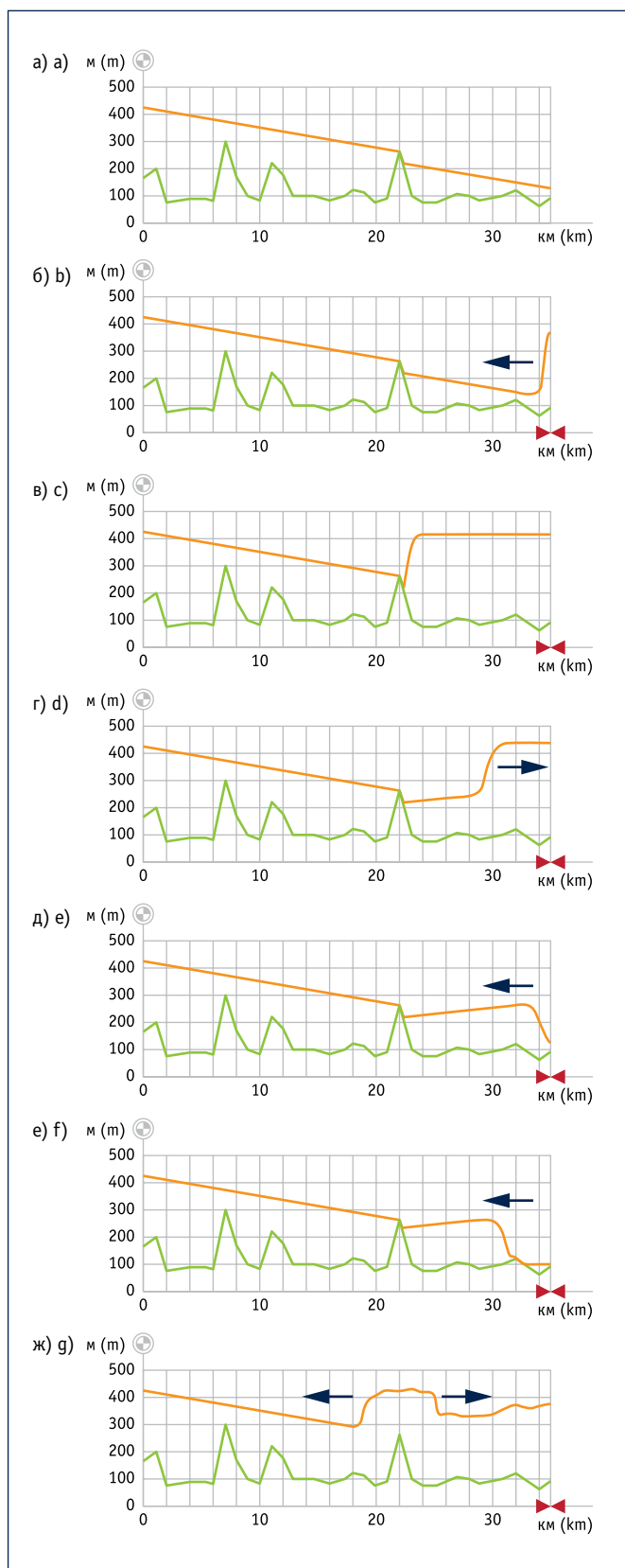


Рис. 3. Расчет гидравлического удара на участке трубопровода с разрывом сплошности потока

Fig. 3. Hydraulic shock calculations in the pipeline flow discontinuity section

$L = 35$ км с заданным профилем из труб с внешним диаметром $D = 720$ мм и толщиной стенки $\delta = 10$ мм. Перекачку нефти плотностью $\rho = 870$ кг/м³, вязкостью $\nu = 0,072$ м²/ч, с упругостью насыщенных паров транспортируемого флюида $p_y = 20$ кПа на участке осуществляет магистральный насос марки НМ-2500–230, установленный в сечении нефтепровода $x = 0$. Подпор перед насосом $h_n = 50$ м, давление в конце участка $p_k = 0,3$ МПа.

В стационарном режиме расход нефти на таком участке составляет 3120 м³/ч, а линия гидравлического уклона, совмещенная с профилем трубопровода, имеет вид, представленный на рис. 3а. В стационарном режиме в нефтепроводе существует самотечный участок (перевальная точка находится в сечении $x_n = 22$ км), длина которого составляет 2,3 км, а степень заполнения 0,27.

Предположим, что задвижка, находящаяся в конце расчетного участка, т. е. в сечении с координатой $x = 35$ км, закрывается. Время закрытия задвижки $t_z = 7$ с. К моменту полного закрытия задвижки (через 7 с от начала закрытия) в конечном сечении нефтепровода давление возрастает до 2,45 МПа (на рис. 3б показана линия гидравлического уклона в этот момент).

Далее давление перед задвижкой продолжает увеличиваться, причем волна повышенного давления распространяется в сторону нефтеперекачивающей станции (НПС) (на рис. 3 направление движения волны давления показано стрелкой). Через 18 с от начала закрытия задвижки волна повышенного давления достигает самотечного участка (рис. 3в), причем давление в конечном сечении составляет 2,77 МПа, а затем отражается от него. Самотечный участок не пропускает волну давления к насосной станции, и станция продолжает работать в том же режиме, что и до закрытия задвижки. Скачок давления перемещается влево (рис. 3г), а давление перед задвижкой продолжает расти.

Дойдя до задвижки, волна повышенного давления отражается, превращаясь в волну пониженного давления, и начинает движение вверх по потоку (рис. 3д). Процесс может сопровождаться возникновением и исчезновением новых самотечных участков (рис. 3е).

Поскольку насос на НПС продолжает работать, в рамках переходного процесса происходит постепенное заполнение первоначального самотечного участка и сокращение его длины. Через некоторое время (в данном примере через 2 мин после закрытия задвижки) самотечный участок полностью исчезает, и волна повышенного давления начинает распространяться в сторону НПС (рис. 3ж).

Следует отметить, что, несмотря на небольшую длину участка в рассматриваемом примере (35 км), повышение давления на НПС регистрируется только через 2 мин 18 с от начала закрытия задвижки. В то же время в отсутствие самотечного участка в данном трубопроводе давление на НПС повысилось бы уже через 38 с от начала закрытия задвижки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая обобщенная теория волновых процессов в магистральных нефтепроводах, допускающая фазовые переходы из жидкой в парообразную форму, позволяет выполнять расчеты переходных процессов в трубопроводах с большой разностью высотных отметок профиля. Такие расчеты позволяют обнаружить эффекты, значимые с точки зрения безопасности эксплуатации трубопроводов. В частности, приведенный в работе пример демонстрирует отражение волны гидравлического удара от парогазовой области, образовавшейся в результате разрыва сплошности потока. При этом перекрытие задвижки (как, впрочем, и разрыв трубопровода [6] или аварийная остановка перекачивающей станции [7]) не может быть быстро идентифицировано по динамике изменения давления на нефтеперекачивающей станции.

Литература:

1. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. 3-е изд. М.: УРСС, 2011. 104 с.
2. Чарный И.А. Неустойчившееся движение реальной жидкости в трубопроводах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1975. 296 с.
3. Годунов С.К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики // Математический сборник. 1959. Т. 47 (89). №3. С. 271–306.
4. Лурье М.В., Полянская Л.В. Об опасном источнике волн гидравлического удара в рельефных нефте- и нефтепродуктопроводах // Нефтяное хозяйство. 2000. №8. С. 66–68.
5. Архангельский В.А. Расчеты неустойчившегося течения в открытых водотоках. М.: АН СССР, 1947. 136 с.
6. Дидковская А.С., Лурье М.В. Истечение нефти через сквозное отверстие в поверхности трубопровода // Нефтяное хозяйство. 2017. №2. С. 104–107.
7. Дидковская А.С., Лурье М.В. Моделирование остановки (выбега) нефтеперекачивающей станции // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. №8. С. 90–95.

References:

1. Zhukovskiy N.Ye. On Hydraulic Shock in Water Pipes. 3d edition Moscow: URSS; 2011. (In Russ.)
2. Charniy I.A. Transient Flow of Real Fluid in Pipelines. 2d edition, revised and enlarged. Moscow: Nedra; 1975. (In Russ.)
3. Godunov S.K. The Difference Numerical Technique for Discontinuous Solutions of Hydrodynamical Equations. Matematicheskiy sbornik [Math-based collected articles]. 1959;47(89);3:271–306. (In Russ.)
4. Lurie M.V., Polyanskaya L.V. On the Dangerous Source of Hydraulic Shock Waves in Relief Oil- and Oil-Product Pipelines. Neftyanoe khozyaistvo [Oil Industry]. 2000;8:66–68. (In Russ.)
5. Arkhangelskiy V.A. Calculations of the Transient Flow in Open Channels. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1947. (In Russ.)
6. Didkovskaya A.S., Lurie M.V. Oil Leakage through a Hole in Surface of a Pipeline. Neftyanoe khozyaistvo [Oil Industry]. 2000;2:104–107. (In Russ.)
7. Didkovskaya A.S., Lurie M.V. Modeling of Pump Station Stoppage Mode. Territoriya "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2015;8:90–95. (In Russ.)