

УДК 621.643.8

В.В. Бараков, К.С. Резанов

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ УТЕЧКИ ИЛИ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОЙ ВРЕЗКИ В НЕФТЕПРОВОДЕ

В данной статье рассматривается программный комплекс, написанный автором для моделирования волны давления, возникшей в результате образования утечки или несанкционированной врезки на участке нефтепровода, одной из главных особенностей которого является учет распада волны давления на стыке трубопроводов с различным диаметром. Благодаря этому данная программа позволяет произвести моделирование в реальном времени изменения параметров нефти с графической визуализацией и сравнить их с реальными данными, получаемыми с производственных объектов.

Ключевые слова: волна давления; утечка или несанкционированная врезка; компьютерное моделирование.

V.V. Barakov, K.S. Rezanov

Gubkin University of oil and gas, Russia, Moscow

COMPUTER SIMULATION OF PRESSURE WAVE PROPAGATION IN THE EVENT OF A LEAK OR UNAUTHORIZED TIE-IN IN AN OIL PIPELINE

This article discusses a software package written by the author for modeling a pressure wave that occurred as a result of the formation of a leak or unauthorized tie-in on an oil pipeline section, one of the main features of which is to take into account the decay of a pressure wave at the junction of pipelines with different diameters. thanks to this, this program allows you to perform real-time modeling of changes in oil parameters with graphical visualization and compare them with real data obtained from production facilities.

Keywords: pressure wave; leak or unauthorized insertion; computer simulation.

В процессе эксплуатации любого трубопровода, в том числе и нефтепровода, стандартно работающего в установившемся режиме, существует вероятность происхождения тех или иных технологических операций, а также нештатных ситуаций, приводящих к переходу режима работы трубопровода в неустановившийся [1]. Нестационарный (переходный) процесс характеризуется изменением основных параметров течения жидкости не только от сечения к сечению, но и в каждом сечении в зависимости от времени и генерирует волну давления, распространяющуюся вверх и вниз по течению нефти [2].

Одной из распространенных причин возникновения в трубопроводе неустановившихся процессов являются различные аварийные ситуации, в частности появление утечки или несанкционированной врезки, которые нарушают

безопасность и бесперебойность работы трубопровода, а также могут привести к нарушению его конструкции и даже разрыву, за счет колебаний давлений [3,4].

Поэтому исследование и компьютерное моделирование данных технологических процессов является важной задачей не только трубопроводного транспорта, но и нефтегазовой отрасли в целом [5].

Для определения параметров нефти в m -ый момент времени в k -ом сечении (данные параметры составляют двумерные массивы) при возникновении утечки или несанкционированной врезки в k^* -ом сечении вводится система координат относительного трубопровода с началом координат в начале исследуемого линейного участка. Рабочей зоной перекачки нефти считаются координаты $x_k \in [0; L]$.

Для проведения расчетов, пользователю необходимо начать работу в программе с ввода ряда характеристик трубопровода и нефти, который можно осуществлять как вручную, так и с помощью таблиц excel:

- 1) Профиль трассы трубопровода $\{x_k, z_k\}$ (x_k – координата, м; z_k – высотная отметка, м);
- 2) ρ – плотность, кг/м³;
- 3) ν – кинематическая вязкость, м²/с;
- 4) K_p – модуль упругости нефти, Па;
- 5) E – модуль упругости 1-го рода материала трубопровода, Па;
- 6) D_k – внешний диаметр участка, мм;
- 7) p_n – начальное давление, МПа;
- 8) L – длина трубопровода, км;
- 9) δ_k – толщина стенки участка, мм;
- 10) Δ – абсолютная шероховатость стенки, мм;
- 11) Q – расход, м³/ч;
- 12) x_{k^*} – координата утечки или несанкционированной врезки, м;
- 13) s – площадь сечения, через которое происходит течение нефти, м².

При первоначальном расчете вычисляется ряд вспомогательных параметров для моделирования, а именно:

— внутренний диаметр трубопровода:

$$d_k = D_k - 2 \cdot \delta_k; \quad (1)$$

— скорость распространения волны давления:

$$c_k = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{K_p} + \frac{\rho \cdot d_k}{E \cdot \delta_k}}}; \quad (2)$$

— средняя скорость движения потока в начальный момент времени:

$$u_{0,k} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_k^2}; \quad (3)$$

— число Рейнольдса в начальный момент времени:

$$\text{Re}_{0,k} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_k \cdot \nu}. \quad (4)$$

Затем производится базовый гидравлический расчет нефтепровода в начальный момент времени. Исходя из чисел Рейнольдса для каждого сечения в начальный момент времени определяется коэффициент гидравлического сопротивления — $\lambda_{0,k}$ по классическим формулам гидравлики [6] или по формулам [7].

Далее рассчитывается гидравлический уклон в каждом сечении в начальный момент времени с учетом усредненных потерь на местные сопротивления:

$$i_{0,k} = 1,02 \cdot \lambda_{0,k} \cdot \frac{1}{d_k} \cdot \frac{u_{0,k}^2}{2 \cdot g}. \quad (5)$$

Вычисляется давление в каждом сечении в нулевой момент времени, учитывая, что $p_{0,0} = p_n$:

$$p_{0,k+1} = p_{0,k} + \rho \cdot g \cdot \left(\frac{u_{0,k}^2 - u_{0,k+1}^2}{2 \cdot g} + z_k - z_{k+1} - i_{0,k} \cdot (x_{k+1} - x_k) \right). \quad (6)$$

Основной расчет - вычисление давлений и скоростей, а соответственно и расходов в каждом сечении в каждый момент времени при возникновении утечки или криминальной врезки, производится с помощью метода характеристик, который можно представить в виде системы из двух рекуррентных формул:

$$\begin{cases} p_{m+1,k} = \frac{p_{m,k-1} + p_{m,k+1}}{2} + \rho \cdot c \cdot \frac{u_{m,k-1} - u_{m,k+1}}{2} + (\varphi_{m,k+1} - \varphi_{m,k-1}) \cdot \frac{(x_{k+1} - x_k)}{2} \\ u_{m+1,k} = \frac{p_{m,k-1} - p_{m,k+1}}{2 \cdot \rho \cdot c} + \frac{u_{m,k-1} + u_{m,k+1}}{2} - (\varphi_{m,k+1} + \varphi_{m,k-1}) \cdot \frac{(x_{k+1} - x_k)}{2 \cdot \rho \cdot c} \end{cases}, \quad (7)$$

где:

$$\varphi_{m,k} = \lambda_{m,k} \cdot \frac{\rho \cdot u_{m,k}^2}{2 \cdot d_{m,k}} + \rho \cdot g \cdot \frac{z_k - z_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}. \quad (8)$$

Однако данный метод не позволяет определять в следующий момент времени давления и скорости в начальном и конечном сечениях, чтобы это исправить, требуется ввести граничные условия:

— давление и средняя скорость в начале участка в любой момент времени принимаем:

$$\begin{cases} p_{m,0} = p_n; \\ u_{m,0} = u_{0,0} \end{cases}; \quad (9)$$

— в конце участка принимаем, что давление и средняя скорость остаются постоянными:

$$\begin{cases} p_{m,N} = p_{0,N} \\ u_{m,N} = u_{0,N} \end{cases}, \quad (10)$$

где индекс N - номер последнего сечения нефтепровода ($x_N = L$).

Для сечения нефтепровода, в котором происходит непосредственно истечение нефти, дополнительно к системе (7) накладываются условия сопряжения:

$$\begin{cases} p_{m,k}^- = p_{m,k}^+ \\ Q_{m,k}^- - Q_{m,k}^+ = q = \mu_0 \cdot s \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{p_{m,k}^* - p_{атм}}{\rho}} \end{cases}, \quad (11)$$

где μ_0 - коэффициент расхода (для тонких стенок обычно принимают $\mu_0 = 0,62$), $p_{атм}$ - атмосферное давление (примем, что грунт рыхлый и давление снаружи нефтепровода равно атмосферному). Индекс «-» показывает, что данный гидродинамический параметр определяется до места утечки, а индекс «+», что после.

Результаты расчета моделирования распространения волны давления, произведенного с помощью ранее описанного алгоритма, удобнее всего представить в виде графика распределения давления по длине нефтепровода в реальном времени. На рисунке 1 представлен данный график для нефтепровода, имеющего две вставки различных диаметров и утечку нефти в середине участка. Как видно из графика, в месте утечки происходит распространение волны давления, которая идет как по течению нефти, так и против него, а в местах, где находятся вставки, происходит не только прохождение, но и отражение волны давления в обратную сторону, то есть ее распад на волну сжатия и волну разрежения. Также стоит отметить, что волна отражения имеет более высокую амплитуду по сравнению с падающей волной.

Таким образом, автором был разработан программный комплекс, моделирующий возникновение и распространение волны давления по длине нефтепровода, проанализирован и исследован феномен отражения волны давления от вставок.

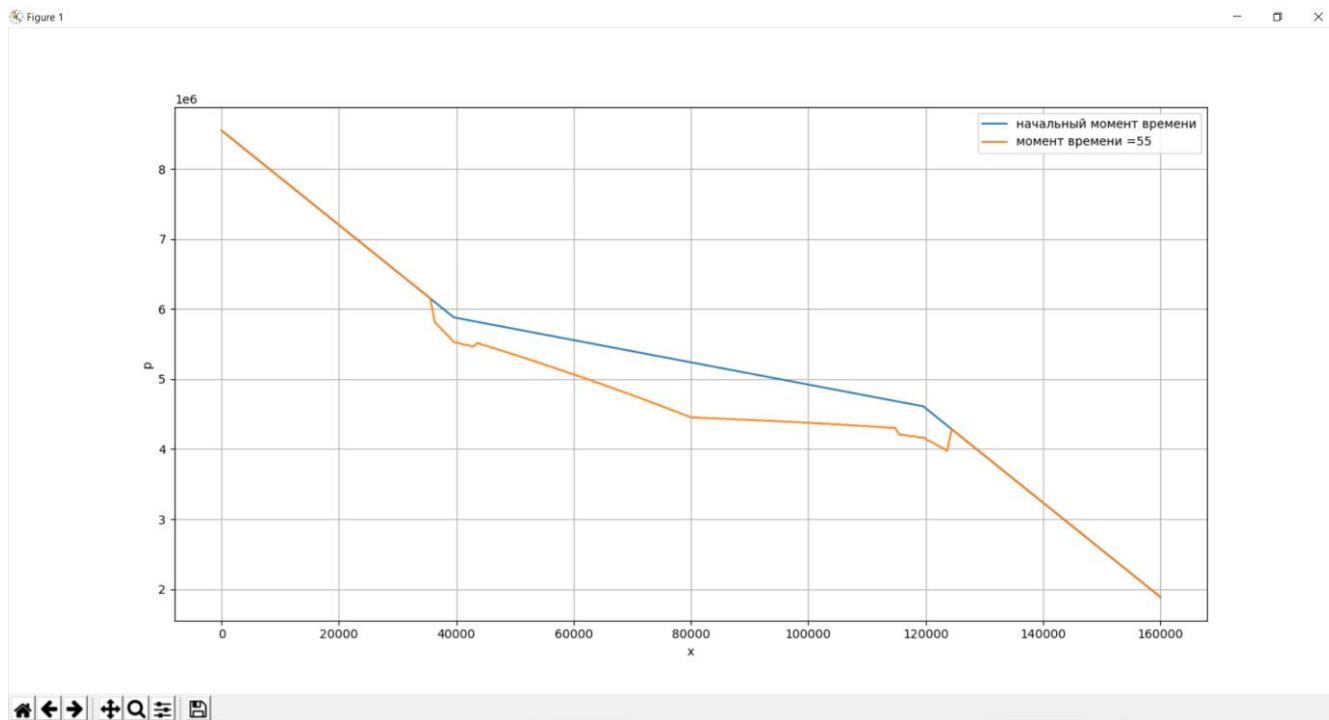


Рисунок 1 – Окно с графиком распределения волны давления по длине нефтепровода в реальном времени

Список литературы

1. Лурье М.В., Мастобаев Б.Н., Ревель-Муроз П.А., Сощенко А.Е. Проектирование и эксплуатация нефтепроводов: Учебник для нефтегазовых вузов. – М.: ООО «Издательский дом Недра». – 2019. – 434 с.
2. Поляков В.А., Шестаков Р.А. Расширение параметрических методов обнаружения утечек и несанкционированных врезок на магистральных нефтепроводах // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 3. – С.57-59.
3. Уланов В.В., Яцкевич Д.А., Филиппов С.А. К вопросу о моделировании гидравлического удара в трубопроводах // Промышленный сервис – 2015. – № 4. – С.33-39.
4. Поляков В.А., Шестаков Р.А. Системный подход к проектированию трубопроводов [Электронный ресурс]: учебное пособие - М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2018. – Режим доступа: <http://elib.gubkin.ru/content/22990> (дата обращения: 29.06.2020).
5. Дейнеко С.В., Алихашкин А.С., Шестаков Р.А., Уланов В.В. Основное технологическое оборудование и процессы транспорта нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс]: учебное пособие – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2018. – Режим доступа: <http://elib.gubkin.ru/content/23045> (дата обращения: 28.06.2020).

6. Лурье, М.В. Теоретические основы трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. – М.: Недра. – 2017. – 477 с.

7. РД 24.040.00-КТН-062-14. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Магистральные нефтепроводы. Нормы проектирования. – М.: ОАО «АК «Транснефть». – 2014. – 165 с.

Сведения об авторах

Барakov Владислав Витальевич – студент РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, email: vlad-barakov2014@yandex.ru

Резанов Константин Сергеевич – студент РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, email: rezanov_ks@mail.ru

About the authors

Barakov Vladislav Vitalievich – Student of Gubkin University, Moscow, email: vlad-barakov2014@yandex.ru

Rezanov Konstantin Sergeevich – Student of Gubkin University, Moscow, email: rezanov_ks@mail.ru