

УДК 519.673

ОЦЕНКА РИСКА ПОВРЕЖДЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

С.В. ШИЛЬКО,
Ю.Г. КУЗЬМИНСКИЙ

*ГНУ Институт механики металлополимерных систем НАН Беларуси им. В.А.
Белого, г. Гомель, Беларусь*

В целях прогнозирования аварийных ситуаций в условиях трубопроводного транспорта нефти (ТТН) анализируются факторы риска повреждений магистрального нефтепровода и разрабатывается адаптивная система управления «средства мониторинга – компьютерная модель переходных процессов – диспетчер – исполнительные устройства». Приведены оценки параметров гидравлических расчетов режимов ТТН, полученные по данным РУП «Гомельтранснефть Дружба». Результаты моделирования использованы для прогноза стационарных и переходных режимов, а также обучения оперативного персонала станций.

Ключевые слова: нефтепровод, повреждения, комплекс «человек-машина», моделирование.

Введение. Прогнозирование безопасности трубопроводного транспорта нефти и соответствующее обучение оперативного персонала стало актуальным вследствие значительного старения магистральных нефтепроводов, построенных в СССР более 30 лет назад, при ежегодном росте производительности в последнее десятилетие. Длительность эксплуатации практически всех трубопроводов на территории РБ превысила нормативные амортизационные сроки, а режимы перекачки достигли и зачастую превышают расчетную производительность. Особенно высока степень риска в переходных процессах, характеризующихся ударными гидродинамическими явлениями. В настоящей работе разрабатываются элементы адаптивной системы управления магистральным нефтепроводом для минимизации риска повреждения в переходных режимах.

Формулировка задачи. В порядке убывания амплитуды источники ударных волн в магистральном трубопроводе располагаются в следующем порядке:

- остановка насосных станций;
- перекрытие потоков при аварийном отказе задвижек на трассе;
- пуск и остановка насосных агрегатов.

В порядке частоты событий гидродинамические явления возникают вследствие:

- пуска и остановки насосных агрегатов по действиям диспетчера или реакциям защит;
- насосных станций;
- остановки насосных станций при срабатывании систем защит в аварийных ситуациях;
- порыва магистральных трубопроводов;
- перекрытия потоков при выходе из строя задвижек.

Представляется, что наиболее эффективным средством прогнозирования и обеспечения безопасности трубопроводного транспорта нефти является комплекс адаптивного управления «человек – машина», включающий средства мониторинга (датчики), компьютерные модели переходных процессов и базы данных, диспетчерский персонал и исполнительные устройства (насосы, задвижки и т.д.). Такой комплекс, реализующий благодаря обратной связи замкнутый контур управления, способный к самообучению и функционирующий в реальном времени, способен к быстрому и гибкому реагированию на нештатные ситуации.

Возможности создания подобного комплекса созданы на таких крупных предприятиях трубопроводного транспорта, как «Гомельтранснефть «Дружба». Адаптация комплекса к возмущающим факторам и уровень безопасности процесса перекачки повышаются при взаимодействии средств защиты магистральных трубопроводов [1]. К ним относятся системы:

- регулирования давления во избежание кавитационного разрушения рабочих колес насосов и разрывов трубопроводов;
- сброса волн давления в безнапорную емкость для снижения скорости роста давления на фронте волны;
- создания встречных волн пониженного давления;
- остановки первого или всех насосов при аварийных значениях давлений на входе и выходе станции, а также в технологических трубопроводах станции.

Ключевой задачей диспетчерского и автоматического управления является обеспечение соотношения для рабочего давления и его предельного значения по условию разрушения трубопровода

$$P_x \leq P_x^{\max} = \frac{2\delta \cdot \sigma_p}{10^4 g(D_y - 2\delta)} \left(\frac{k_y}{n} \right),$$

где D_y – учетный диаметр трубы; δ – толщина стенки; σ_p – предел прочности стали; k_y и n – нормативные коэффициенты условий работы и допустимых перегрузок соответственно. Реальное результирующее значение нормативных коэффициентов снижения пределов рабочих давлений в трубах близко к 0,5.

В переходных процессах давление P_x в точке x трубопровода имеет 2 составляющие

$$P_x = P_x^{cm} + \Delta P_x^{mm},$$

где P_x^{cm} – давление по исходному стационарному процессу перекачки; ΔP_x^{mm} – давление фронта ударной волны, достигшего точки x . Амплитуды давления ΔP_0 в точке возникновения ударной волны и на удалении x связаны соотношением $\Delta P_x = \Delta P_0 f_c(x)$, где $f_c(x)$ – функция гашения амплитуды волны.

Распространенным способом проверки безопасности технологических процессов перекачки и обучения персонала управлению этими процессами является использование программных имитационных моделей. Такие модели должны обеспечивать реальный масштаб времени моделирования, погрешность расчета давлений и скоростей потоков порядка 1–2 %, идентификацию диаметров труб, характеристик насосов и переходных процессов.

На рисунке 1 приведены прогнозные графики давлений статического режима и переходного процесса при остановке насосной станции, полученные применением имитационной модели нефтепровода для одного из участков нефтепровода РУП «Гомельтранснефть «Дружба».

Метод исследования. Инженерный подход, использованный авторами при разработке оригинальной компьютерной программы прогноза параметров нефтепроводов в статических и динамических режимах DIMONT, является развитием методов [2,3] и основан на следующих зависимостях:

1. Для амплитуды фронта для волны напора в направлении и против потока при пуске насосного агрегата

$$\begin{cases} \Delta h_{+0}^+ = k_+ (a + bq + cq^2) \\ \Delta h_{-0}^+ = (k_+ - 1)(a + bq + cq^2) \end{cases}, \quad (1)$$

где q – объемная скорость в момент включения; a , b , c – коэффициенты квадратичной аппроксимации напорной характеристики насоса.

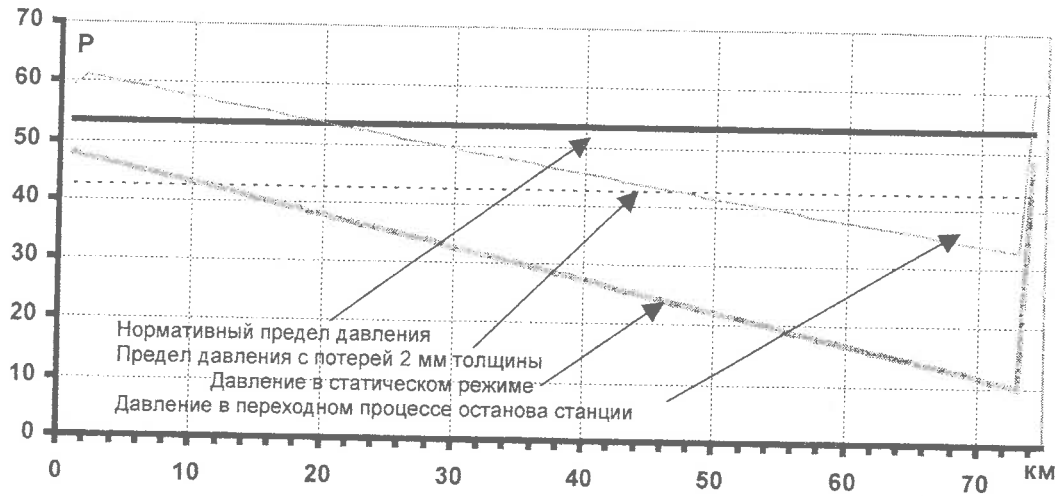


Рисунок 1 – Прогноз пределов и рабочих давлений на перегоне при остановке станции.

При остановке насоса

$$\begin{cases} \Delta h_{+0}^- = -k_+ (a + bq + cq^2) \\ \Delta h_{-0}^- = (1 - k_-) (a + bq + cq^2) \end{cases} \quad (2)$$

В формулах (1,2) коэффициенты k_+ и k_- являются параметрами фронта волн в точке возникновения при пуске или остановке насосного агрегата. Для головной насосной станции участка нефтепровода

$$k_+ = k_- = 1.$$

2. Гашение амплитуды фронта напора при распространении волны вычисляется по формуле Жуковского

$$|\Delta h_x| = |\Delta h_{\pm 0}| \cdot e^{-k_c \frac{i}{c} x} \quad (3)$$

Функция гашения волны имеет вид

$$f_c(x) = e^{-k_c \frac{i}{c} x},$$

где i – гидравлический уклон; c – скорость звука; x – расстояние от источника волны до расчетной точки.

Гидравлический уклон определяется по обобщенной формуле Лейбензона

$$i = \beta \frac{v^\alpha q^{2-\alpha}}{d^{5-\alpha}} \quad (3a)$$

Здесь d – идентифицируемый диаметр; v – кинематическая вязкость нефти. Для турбулентного потока в зоне труб с гладкими стенками $v = 0,0247$, $\alpha = 0,25$. Скорость звука не зависит от потока и определяется формулой Жуковского

$$c = \left[\rho \left(\frac{1}{K_o} + \frac{(d_y - 2\delta)}{2\delta K_s} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3б)$$

где ρ , K_o и K_s – плотность, объемные модули упругости при сжатии нефти и стали. В приближенном, но быстро вычисляемом варианте функции гашения имеют вид

$$f_c(x) = (\beta_c)^x, \quad (3в)$$

где β_c – конкретное для исходного стационарного режима основание степенной функции гашения, определяемое по формуле

$$\beta_c = e^{-k_c \frac{t}{c}}.$$

в) Аналогично (2) устанавливается связь амплитуд фронтов волн напора и объемной скорости

$$|\Delta q_x| = |\Delta h_x| \cdot k_q \cdot \frac{\pi d^2}{4 \cdot 10^5 c}, \quad (4)$$

где k_q – идентифицируемый коэффициент связи волн скорости и давления.

Таким образом, задаются плотность ρ ; вязкость ν ; расстояние x от источника волны до расчетной точки; d и (a, b, c) – идентифицируемый эквивалентный диаметры и напорные характеристики насосов; K_o, K_s – объемные модули упругости нефти и стали; D_y, δ – внешний диаметр и толщина стенок труб; σ^p – предел прочности стали; q – определяемая из уравнения баланса энергии объемная скорость перекачки в стационарном режиме. К числу подлежащих идентификации относятся коэффициенты: k_+ , k_- – распределения напора при пуске – остановке насоса; k_c – гашения амплитуды фронта напора; k_q – связи амплитуд напора и скорости потока. Для адекватного моделирования введен блок генерации причин переходных процессов:

- порыв трубопровода стандартного размера при превышении расчетными давлениями пределов рабочих давлений;
- срабатывание исполнительного устройства автоматического регулирования, порождающего волны давления и скорости;
- срабатывание систем защит по аварийным давлениям, порождающих волны давления и скорости, вызванные остановкой первого насоса или станции целиком;
- формирование новых волн напора вследствие изменения объемных скоростей на включенных насосах.

Необходимость сокращения времени моделирования переходных процессов обусловлена разбиением временного интервала в любой точке нефтепровода на 3 стадии: ожидание волны, прохождение фронта волны и переход к конечному стационарному режиму.

Исходные данные и пример прогнозирования. Для идентификации модели переходных процессов были использованы данные Гомельского управления нефтепровода «Дружба» по режимам перекачки на западном приграничном участке

«Мозырь-Туров-Пинск-Кобрин» с расстоянием между станциями 120 – 123 – 122 – 86 км соответственно. Причинами переходных процессов были: 1) остановка головной насосной станции при срабатывании аварийной защиты; 2) последовательные диспетчерские остановки всех насосов участка; 3) включения насосов для выхода на исходный режим. Данные были представлены в виде зависимостей давлений и объемных скоростей, измеренных с погрешностью 0,2 %. Временной интервал события – 2 часа. В частности, в таблице 1 приведены результаты расчета коэффициентов гашения волн против потока ($-k_c$) и по потоку ($+k_c$) при остановке (-) и пуске (+) насосов. Распространение ударной волны с резким фронтом ограничивается расстоянием от предшествующей до следующей насосной станции.

Таблица 1 – Значения коэффициента k_c гашения волны напора.

Насос	$-k_c$	$+k_c$	Насос	$-k_c$	$+k_c$
$-A_{Т}^1$	7,9	4,2	$+A_{М}^{21}$	–	–
$-A_{Т}^2$	–	2,4	$+A_{М}^{22}$	–	39,0
$-A_{Т}^3$	0,5	2,1	$+A_{Т}^1$	10,5	20,5
$-A_{П}^1$	0,5	4,4	$+A_{Т}^2$	4,3	5,7
$-A_{П}^2$	3,5	6,1	$+A_{Т}^3$	4,9	10,3
$-A_{П}^3$	6,0	6,5	$A_{П}^1$	10,0	8,6
$-A_{К}^1$	5,4	–	$+A_{П}^2$	6,6	2,5
$-A_{К}^3$	1,9	–	$+A_{П}^3$	6,6	3,4
Среднее	4,2	4,0	Среднее	7,2	12,8

Отметим, что разработанная модель обладает интерфейсом с системой управления в реальном масштабе времени, автоматической и ручной идентификацией диаметров и характеристик насосов, средствами задания параметров переходных процессов. Она позволяет рассчитать гидравлические параметры, энергетическую эффективность режима и параметры ударных волн с автоматически генерируемыми причинами переходных процессов. Учитываются температурные воздействия и связанность трубопроводов.

Выводы. Изложенный в статье подход обеспечивает прогнозирование нештатных ситуаций, связанных с переходными гидродинамическими процессами в магистральном нефтепроводе. Применение адаптивной системы управления является эффективным средством повышения безопасности технологического процесса трубопроводного транспорта нефти.

Обозначения

D_y и d – учетный и идентифицируемый диаметр трубы; δ – толщина стенки трубы; σ_p – предел прочности стали; k_y и n – нормативные коэффициенты условий работы и допустимых перегрузок; h – напор (м); P , ΔP – давление и перепад давления (кгс/см²) соответственно; $f_c(x)$ – функция гашения амплитуды волны; q , Δq – объемная скорость и перепад скорости (м³/с); a , b , c – коэффициенты квадратичной аппроксимации напорной характеристики насоса; c – скорость звука (м/с); x – контрольное расстояние (м); ρ , ν – плотность (кг/м³) и кинематическая вязкость (м²/с) нефти; t – время; σ^p – предел прочности стали (Па); K_o , K_s – объемные модули упругости на сжатие нефти и стали соответственно (Па); k_q – идентифицируемый коэффициент связи волн скорости и давления.

Литература

- 1 Кузьминский Ю.Г., Вьюн В.И. Гидравлическое взаимодействие систем защит магистрального нефтепровода в переходных процессах // Сб. научн. тр. «Безопасность и надежность трубопроводного транспорта». – Новополоцк, 2003. – № 3. – С. 56-67.
- 2 Юфин В.А. Трубопроводный транспорт нефти. – М.: Недра. – 1978.
- 3 Вязунов Е.В. Методика расчета перегрузок трубопровода по давлениям в переходных процессах // Нефтяное хозяйство. – 1973. – № 9. – С. 45-47.

Поступила в редакцию 9.01.2008.

S.V.Shil'ko, J.G.Kuz'minsky

ESTIMATION OF RISK OF DAMAGES OF THE MAIN OIL PIPELINE

For the prediction of incidents which is caused by oil transportation, the risk factors of pipe's failure have been analyzing and adaptive control system «monitoring-computer model-operator-device» has been developed. The estimation of hydraulic parameters based on «Gomeltransneft Druzhba» data is given. The modeling results has been used for the stationary and transfer regimes as well as for operators training.