

УДК 519.876

Ю.Г. Кузьминский, С.В. Шилько

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ

Излагается подход к моделированию гидродинамических явлений, возникающих при трубопроводном транспорте нефти. Приводятся основные расчетные зависимости и описываются параметры модели, а также ее реализация в виде программного обеспечения «Димонт». Дается оценка адекватности модели при ее использовании в прикладных расчетах.

Введение

Основными задачами управления магистральными нефтепроводами, ввиду их высокой стоимости, необходимости стабильного функционирования в условиях исчерпания нормативного ресурса, большого потребления электроэнергии и значительных затрат на преодоление последствий аварий, являются обеспечение безопасности технологического процесса, выполнение планов перекачки и повышение энергоэффективности процесса. Необходимость иметь средства, работающие в реальном масштабе времени, для прогнозирования параметров технологического режима в целях повышения его безопасности и энергоэффективности, для обучения управляющего персонала и для идентификации параметров технологического процесса делает актуальным моделирование процесса трубопроводного транспорта нефти.

Реализация излагаемого в статье подхода к решению прикладных задач гидродинамики нефти включает разработку иерархической структуры моделируемых объектов (участков трубопровода, насосных агрегатов), уточнение математических зависимостей между входными переменными и откликами, выделение и реализацию основных компонентов системы с последующим тестированием модели. Для повышения мобильности основные компоненты модели (блоки статических режимов, переходных процессов и идентификации) должны быть реализованы в едином программном модуле.

Трубопроводный транспорт (перекачку) нефти можно охарактеризовать как преобразование электроэнергии в гидравлический напор агрегатами насосных станций и преодоление сил трения при течении нефти как вязкой жидкости. Течение чаще всего является турбулентным в зоне труб с гладкими стенками и ламинизируется применением противотурбулентных присадок. Важную роль играют системы автоматического регулирования, реализующие трехуровневые ограничения давлений по минимуму на входе и по максимуму на выходе станций. Насосы работают как последовательно, так и параллельно. На участке между двумя резервуарными парками параллельные нитки трубопроводов (лупинги) частично или полностью гидравлически связаны (рис. 1). Ударная волна, порождаемая включением насосов и задвижек, распространяется со скоростью звука и затухает в течение интервала времени, необходимого для прохода отраженной волны [1]. При развитии такого переходного процесса возможны реакции систем защит и повреждения трубопроводов, вызывающие новые ударные волны [4].

1. Описание модели

Результирующей переменной (откликом) модели статических режимов нефтеперекачки является матрица объемных скоростей течения на нефтеперекачивающих станциях и в линейных пунктах трубопроводов. Исходя из скорости течения путем квадратичных аппроксимаций напорных и мощностных характеристик насосов в статическом режиме определяют потребляемые мощности и давления на станциях с учетом ограничений систем защит. Вычислять локальные давления в точках нефтепровода позволяет обобщенная формула Лейбензона, учитывающая температуру, определяющую плотность и кинематическую вязкость нефти, геодезические параметры, а также эквивалентные диаметры труб, отражающие местные сопротивления запорной арматуры и твердые отложения на стенках [1]:

$$\Delta h = \beta \frac{v^\alpha q^{2-\alpha}}{d^{5-\alpha}} l + z_{\text{кон}} - z_{\text{нач}},$$

где параметры α и β турбулентного течения в трубах с гладкими стенками являются функциями новой переменной y – степени ламинаризации потока и граничных значений числа Рейнольдса в переходной зоне [3]:

$$\alpha(y) = 0,25 + y(1 - 0,25);$$

$$\beta(y) = \frac{0,2572(\text{Re}_2 - y(\text{Re}_2 - \text{Re}_1))^{\alpha(y)-0,25}}{4^{\alpha(y)} \pi^{2-\alpha(y)}}.$$

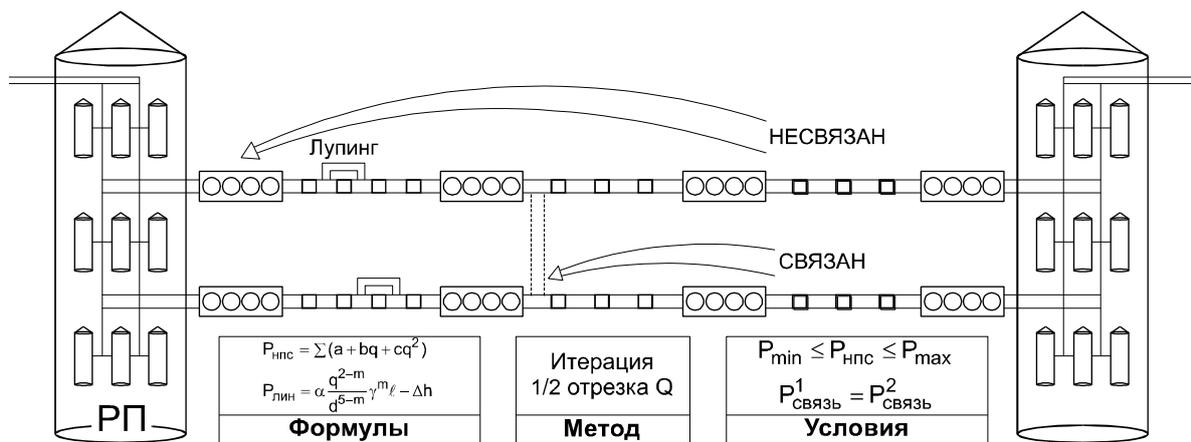


Рис. 1. Принципиальная схема моделируемого участка нефтепровода

Зависимость степени ламинаризации потока y от концентрации конкретного вида присадок x является линейной, а коэффициенты этой зависимости устанавливаются экспериментально. Предполагается, что зависимость плотности нефти от температуры линейна, а температурная зависимость кинематической вязкости определяется формулой Рейнольдса – Филонова:

$$\rho(t) = \rho_{\min} - a(t - t_{\max});$$

$$v(t) = v_{\min} e^{b(t_{\max} - t)}.$$

Скорость течения в статических режимах определяется итерационно (до пяти-шести итераций в зависимости от установленной точности вычислений) из уравнения баланса энергии, преобразованной насосами и расходуемой в трубопроводах.

Связь амплитуд волн давления и скорости описывается уточненной формулой Жуковского для расчета гашения амплитуды волны напора в зависимости от расстояния x и скорости звука c в трубопроводе:

$$|\Delta h_x| = |\Delta h_0| \cdot \left(e^{-k_h \frac{\beta v^\alpha q^{2-\alpha}}{d^{5-\alpha}} \frac{x}{c}} \right). \quad (1)$$

Для эффективного выполнения циклических расчетов переходных процессов в режиме реального времени натуральная степень в этой формуле с показателем, равным отношению гидравлического уклона и скорости звука, заменена степенью константы с показателем, равным длине участка.

Неуправляемыми параметрами являются число ниток трубопроводов и линейных пунктов, количество станций, геодезические параметры (расстояния и высоты) контрольных точек, температура нефти и зависящие от нее плотность и вязкость, характер течения и пределы рабочих давлений на трассе. К идентифицируемым параметрам относятся эквивалентные диаметры трубопроводов, учитывающие отложения и местные сопротивления; реальные характеристики напора и мощности насосов.

Входными переменными модели объекта являются состояния насосов и задвижек, пределы давлений систем регулирования и защиты, диаметры и предельное открытие заслонок систем регулирования, точность расчетов скорости и давления, основание степенного показателя гашения волны.

К откликам моделей относятся потребляемая насосами мощность, скорость течения и давление нефти, к интегральным откликам – производительность, удельный расход электроэнергии, суммарная мощность, суточное потребление энергии, ее стоимость.

Изменение характеристик насоса моделируется по параметру $k = D_2^1 / D_2^0$ рабочего колеса насоса. Это приводит к следующей модификации коэффициентов параболических аппроксимаций характеристик напора и мощности [6]:

$$k^2 a + k b q + c q^2 = h ;$$

$$k^3 a_e + k^2 b_e q + k c_e q^2 = N .$$

При срабатывании ограничения по максимуму рабочего давления на выходе станции система регулирования прикрывает заслонки, что ведет к созданию дополнительных местных сопротивлений и потерям давления. Задаваемое ограничение открытия заслонки влияет на перепад давлений до и после заслонки (дросселирование) в зависимости от ее диаметра.

Специальный вычислительный эксперимент [5] позволил по фактическим данным, полученным в день аварийной остановки и последующего вывода на рабочий режим участка «Мозырь – Адамова застава», вычислить оценку коэффициента k_h в формуле (1).

Аналогично получены оценки для коэффициента k_q поправок связи амплитуд волн объемной скорости и напора:

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

В зависимости от типа ударной волны данный коэффициент варьируется в интервале [0,4–1,2].

Методом гашения волны при локализации отборов нефти [8] получены оценки коэффициента гашения k_v в интервале [0,85–0,98]:

$$e^{-k_h \frac{\beta \frac{v^\alpha q^{2-\alpha}}{d^{5-\alpha}}}{c}} = k_v .$$

Метод моделирования переходного процесса в контролируемой точке включает три этапа циклического расчета параметров. На первом этапе происходит ожидание волны, зависящее от ее скорости, которая изменяется в интервале 950–1100 м/с. На втором этапе моделируется прохождение фронта волны с учетом гашения амплитуды скачка давления. На третьем этапе осуществляется линейный переход по времени к параметрам ожидаемого и расчетного стационарных режимов.

Возмущения, порождаемые несколькими переходными процессами, в каждой контролируемой точке суммируются. Распространение ударных волн может автоматически породить вторичные переходные процессы повреждения трубопровода или остановки агрегата.

Аналитические зависимости, знаки волн давления и скорости для наиболее распространенных причин порождения переходных процессов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры фронтов ударных волн

Причина возмущения	Параметр	Знаки волны		Формулы для расчета амплитуды фронта волны в точке возмущения
		против потока	по направлению потока	
Включение насоса	Напор Δh_0	–	+	$\Delta h_0 = x \frac{\rho}{2s} q_0$
	Скорость Δq_0	+	+	$\Delta q_0 = xq \left(\left(1 - \frac{h}{b(n+1)x^2 q^2} \right)^{0.5} - 1 \right)$
Выключение насоса	Напор Δh_0	+	–	$\Delta h_0 = x \frac{\rho}{2s} q_0$
	Скорость Δq_0	–	–	$\Delta q_0 = xq \left(\left(1 - \frac{h}{bnx^2 q^2} \right)^{0.5} - 1 \right)$
Порыв	Напор Δh_0	–	–	$\Delta h_0 = x \frac{\rho}{2s} q_0$
	Скорость Δq_0	+	–	$\Delta q_0 = \left(\frac{q \cdot h}{2} \right)^{0.5} \cdot s$
Перекрытие трубы	Напор Δh_0	+	–	$\Delta h_0 = x \frac{\rho}{2s} q_0$
	Скорость Δq_0	–	–	$\Delta q_0 = q$

Примечание: h, q – напор и мгновенный расход в точке возмущения до момента события; s – площадь порыва или сечения; x – константа, полученная эмпирическим путем; $\Delta h_0, \Delta q_0$ – амплитуды фронтов напора и скорости в точке возмущения.

Реализация воздействий систем защиты сводится к остановке насосных агрегатов или станций при соответствующих уровнях нарушений пределов давлений. Моделирование реакции систем регулирования предполагает сложные аналитические зависимости. На рис. 2 изображены графики, полученные при моделировании действия системы автоматического регулирования.

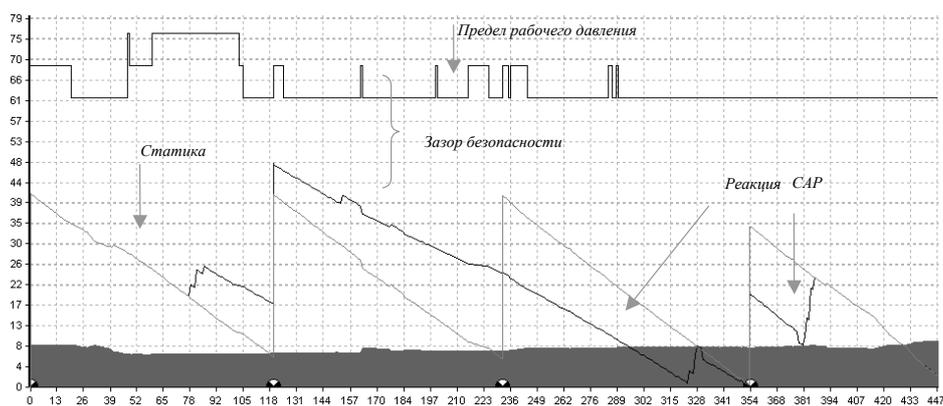


Рис. 2. Реакция системы регулирования четвертой станции на нарушение минимума рабочего давления в результате прихода волны при прекращении работы третьей станции

2. Структура модели

На рис. 3 показаны информационные потоки при практическом использовании модели в виде программного обеспечения «Димонт», в том числе в качестве стенда отладки АСУ ТП ГПТН «Дружба».

При использовании модели имеется возможность ручного задания всех входных параметров и переменных, а также давлений и скоростей потоков. Возможно также сопоставление интегральных параметров для двух режимов одного участка и совмещение соответствующих графиков давлений. В частности, на рис. 4 приведены графики давлений для стационарного и переходного режимов останова промежуточной станции участка «Лисичанск – Тихорецк».

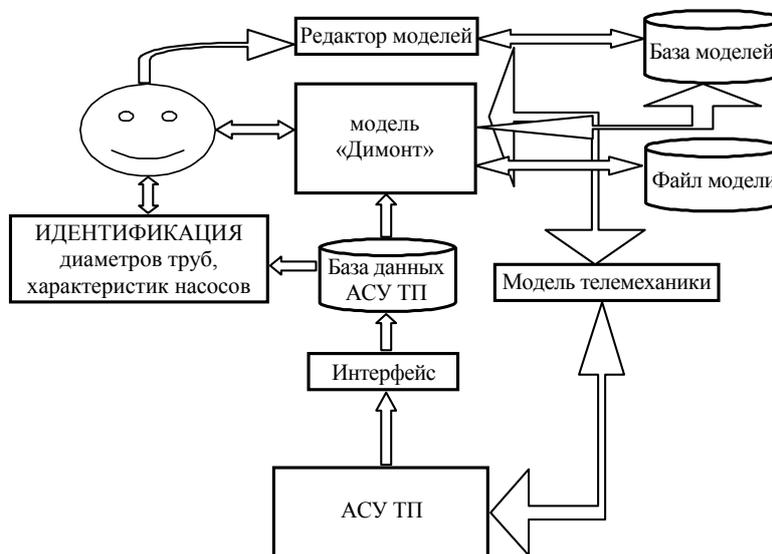


Рис. 3. Схема информационных потоков в «Димонт»

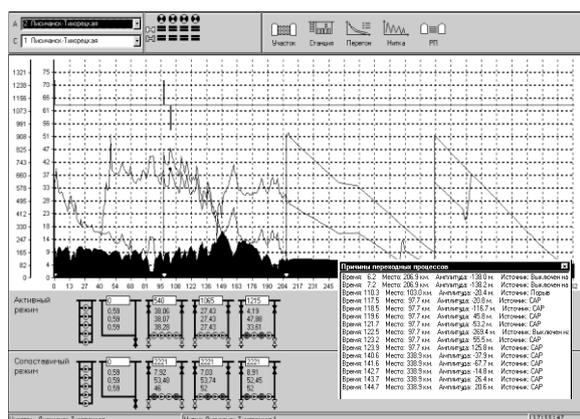


Рис. 4. Переходные процессы при моделировании останова станции

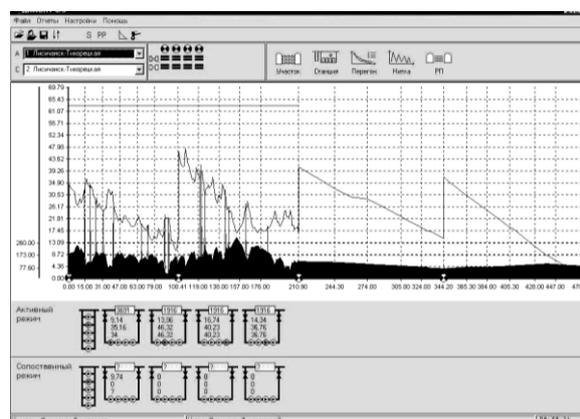


Рис. 5. Сопоставление результатов идентификации с фактическими значениями

3. Адекватность модели

Использование разработанной модели для прогнозирования параметров стационарных режимов перекачки показывает, что при условии точного задания входных переменных (эквивалентных диаметров, характеристик насосов и температуры нефти) достигается точность 0,5 % по максимальному отклонению откликов. Данный результат был подтвержден путем ручной идентификации диаметров трубопроводов и характеристик насосов, когда прогнозируемые характеристики сопоставлялись с фактическими значениями давления, скорости потока и потребляемой мощности, измеренными на участке «Лисичанск – Тихорецк» (рис. 5).

Качественная оценка адекватности моделирования переходных процессов свидетельствует об адекватности алгоритмов. Количественная оценка отклонений прогнозируемых значений давлений от фактических в данном случае затруднена из-за большого объема данных, меняющихся в короткий промежуток времени.

Оценка чувствительности отклика модели для стационарных режимов в соответствии с подходом, изложенным в [2], приведена в настоящей работе частично вследствие большого числа параметров. Так, в расчете режима на участке «Мозырь – Адамова застава» используется до 2000 параметров и входных переменных.

Критерием отнесения параметров к основным является их существенное влияние на изменение практически важных выходных переменных – массы перекачиваемой в единицу времени нефти, суммарной потребляемой мощности и удельного расхода электроэнергии. В этой связи в качестве основных выбраны эквивалентные диаметры трубопроводов, характеристики насосов, число насосов, геодезические параметры отдельных контрольных пунктов, пределы давлений системы регулирования, концентрация присадок, точность расчетов. В табл. 2 приведены абсолютные изменения входных параметров и переменных для максимального по производительности режима участка нефтепровода «Мозырь – Адамова застава», включающего три трубопровода и четыре насосные станции.

Таблица 2

Изменения входных параметров

Обозначения	Входные параметры	Исходные значения	Измененные значения
z	Геодезическая высота третьей станции, м	154	164
l	Расстояние до конечного пункта, км	441	455
q	Точность расчета скорости течения, м ³ /ч	1	10
h	Точность расчета напора, м	2	20
x	Концентрация присадок, г/т	0	5
		–	15
d	Эквивалентный диаметр трубопровода, мм	1074	1095,5
		–	1117
n	Число включенных насосов	14	13
		–	12
k_l	Характеристики насоса	1,0	0,98
		–	0,96
k_n	Характеристики всех работающих насосов	1,0	0,99
		–	0,98
p_{max}	Максимальное давление на третьей станции, бар	48	49
d_{CAP}	Диаметр заслонок четвертой станции, мм	300	200

В табл. 3 приведены оценки изменений входных параметров и откликов модели стационарного режима. Значения откликов даны в нормированном виде.

По относительному изменению откликов наибольшее влияние на показатели перекачки имеет изменение характера течения в трубопроводе. На соотношение изменений параметров и откликов наибольшее влияние оказывает изменение эквивалентного диаметра. Далее следует изменение характеристик насосных агрегатов. В соответствии с данными оценками подтверждается целесообразность рекомендаций по первоочередным мерам увеличения эффективности процесса путем управления характером течения, выбора диаметров труб и характеристик насосов [7]. Малое соотношение изменений температуры и изменений откликов свидетельствует о низкой эффективности использования нагрева нефти. Так, до 30 % потерь энергии в насосах уходит на нагрев нефти, однако это дает прирост нефтеперекачки всего на 0,5 % для участка «Мозырь – Адамова застава». Наименьший отклик в модели дает изменение точности расчетов.

4. Применение разработанной модели и программного обеспечения

Предприятиям транспорта нефти необходимы расчетные оценки изменений параметров технологических режимов, обеспечивающих выполнение показателей экономии энергии. К примеру, разработанная модель позволила предложить корректировку параметров техно-

гического процесса (табл. 4), снижающую годовое энергопотребление участка «Мозырь – Адамова застава» на 6 %.

При соответствующей методической базе использование модели переходных процессов дает необходимый тренажерный навык по управлению переходными процессами персоналом, проходящим переподготовку или первичное обучение.

Использование блока моделирования переходных процессов не дает заметных результатов при решении задач повышения эффективности процесса нефтеперекачки, так как общая длительность переходных процессов не превышает 2 % времени работы нефтепровода. Однако перегрузки нефтепровода по давлению как основному контролируемому физическому параметру безопасности процесса возникают только при развитии переходных процессов, являющихся следствием изменений состояния оборудования. Существующие системы защиты и регулирования обеспечивают автоматическое принятие мер по устранению нарушений пределов давлений на станции и трассе, если источник изменений давления находится на самой станции и станция работоспособна. Волны давления на трассе из-за аварийного перекрытия трубопровода или аварийно остановленной последующей станции вызывают рост давлений на трассе до того, как ситуацию исправят системы защиты предшествующей станции. Это обуславливает большое значение прогнозирования мест возможных нарушений пределов рабочих давлений.

Таблица 3

Относительные и удельные изменения откликов модели нефтепровода

Параметры			Отклики					
Наименование	Обозначение	Изменение x/x_0 $(x-x_0)/x_0$	Масса нефти y/y_0 $(y-y_0) \cdot x_0/(x-x_0) \cdot y_0$		Суммарная мощность		Удельный расход энергии	
Концентрация присадки	Δx	5,0 5,0	1,110	0,022	1,042	0,008	0,939	0,012
		15,0 15,0	1,353	0,024	1,144	0,010	0,845	0,010
Диаметр трубопровода	Δd	1,020 0,020	1,038	1,900	1,014	0,700	0,977	1,150
		1,040 0,040	1,073	1,825	1,028	0,700	0,958	1,050
Число включенных насосов	Δn	0,929 0,071	0,970	0,423	0,919	1,141	0,947	0,746
		0,857 0,143	0,938	0,434	0,839	1,126	0,894	0,741
Характеристики насосов	Δk_l Δk_n	0,98 0,0014	0,999	0,700	0,994	4,200	0,996	2,800
		0,96 0,0029	0,997	1,050	0,989	3,850	0,992	2,800
		0,99 0,010	0,990	1,000	0,970	3,000	0,980	2,000
		0,98 0,020	0,979	1,050	0,941	2,950	0,961	1,950
Высоты и расстояния	Δz Δl	1,075 0,075	1,001	0,013	1,000	0,000	1,000	0,000
		1,009 0,009	0,983	1,889	0,994	0,667	1,002	0,222
Параметры регулирования	Δp_{max} Δd_{CAP}	1,021 0,021	1,003	0,143	1,001	0,048	0,998	0,095
		0,660 0,330	0,999	0,003	0,999	0,003	1,001	0,003
Температура	Δt	1,308 0,308	1,002	0,006	1,006	0,019	1,002	0,006
		1,692 0,692	1,021	0,030	1,012	0,017	0,992	0,012
Точность расчета скорости и давления	Δq Δh	10,0 9,0	1,002	0,0002	1,001	0,0001	0,999	0,0001
		10,0 9,0	0,999	0,0001	1,000	0,0000	1,001	0,0001

Таблица 4

Рекомендуемые изменения параметров

Параметры	Изменения
Длительность периода	Увеличение периода на 13,5 дней
Температура	Увеличение температуры на 10 °С
Средний КПД насосных агрегатов	Увеличение на 4 %
Потери давления на НПС	Снижение на 9 бар
Эквивалентный диаметр	Увеличение на 16 мм

Пределы давлений на трассе бывают нормативными и выявленными после стендовых испытаний с использованием изъятых отрезков трубы. Экспериментально установленные пределы давлений не могут служить основой для изменения пределов давлений на нефтепроводе, так как состояния элемента трубы и остальной ее части в общем случае различны. Проведение внутритрубной диагностики и анализ результатов дают только вероятностные оценки дефектов и пределов рабочих давлений с учетом нормативных коэффициентов запаса. Основная задача моделирования переходных процессов – сопоставить нормативный предел давления на трассе с учетом возможных дефектов (что предполагает возможность изменения пределов рабочих давлений в модели) и рабочее давление в виде суммы статической составляющей и амплитуды пришедшей волны. Поэтому основными задачами верификации модели развития переходных процессов являются полнота моделируемых причин переходных процессов, качественное соответствие знаков волн давления и скорости по направлениям распространения волн, количественное соответствие скоростей распространения волн, соответствие амплитуд волн в исходной точке и степени их гашения на трассе.

Графические зависимости распределения трассовых давлений трубопровода на перегоне «Гомель – Зашебье» (рис. 6) получены путем обработки таблицы давлений из модели «Димонт». Пределы давлений с дефектом получены с учетом американского стандарта, допускающего потерю 25 % толщины стенки трубы. На рисунке видны зоны превышения пределов давлений для трубы с дефектом в статическом режиме и при развитии переходного процесса после остановки последующей станции.

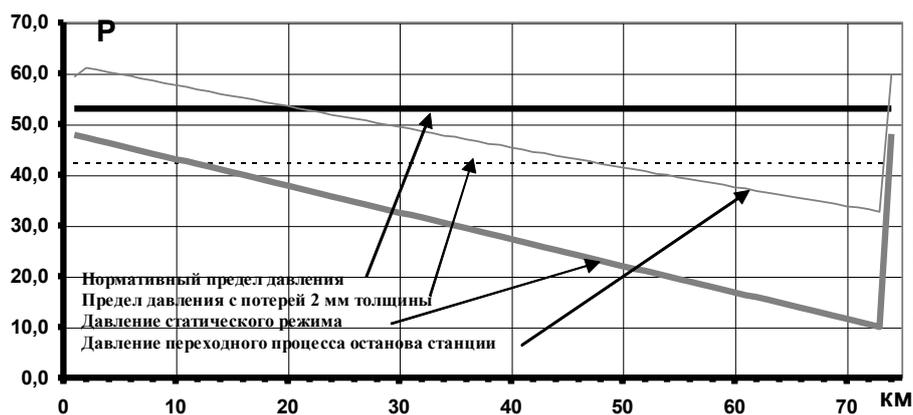


Рис. 6. Прогноз пределов давлений и рабочих давлений на участке нефтепровода при остановке станции

Процедура прогнозирования параметров нового стационарного технологического режима включает следующие этапы:

1. Идентификацию эквивалентных диаметров трубопроводов и характеристик насосных агрегатов по фактическим данным текущего рабочего режима. Данная операция выполняется либо вручную по «бумажным» данным, либо с применением блока идентификации и интерфейса с действующей АСУ ТП. Расчет параметров действующего режима.

2. Внесение с помощью интерфейса изменений, требуемых для реализации прогнозируемого режима, расчет параметров прогнозируемого режима.

3. Сопоставление параметров текущего и нового режимов, оценку эффективности внесенных изменений.

Изменениям, например в связи с ремонтом, подлежат эквивалентные диаметры трубопроводов, характеристики насосов, пределы давлений систем защит и регулирования, концентрация противотурбулентных присадок.

Составив базу данных расчетных опорных режимов и используя методы прогнозирования энергопотребления [6], можно решать задачи выбора оптимального режима для реализации плановых показателей в условиях ресурсных изменений и привнесенных дополнительных про-

стоев. Эти задачи решаются диспетчерским персоналом вручную ежемесячно для каждого из участков нефтепроводов, находящихся в их управлении.

Применение модели в целях прогноза безопасности проектируемых режимов перекачки, требующих значительных капитальных затрат, включает следующие этапы:

1. Идентификацию параметров текущего состояния основного оборудования и расчет максимального режима с максимальной вязкостью.

2. Формирование с помощью интерфейса «Димонт» управляющих воздействий на состояние оборудования, требуемых для реализации прогнозируемого режима. Моделирование переходного процесса.

3. Сопоставление параметров максимального текущего и прогнозируемого режимов с целью оценки последствий внесенных в состояние оборудования изменений.

4. Задание причины переходного процесса, дающего максимальные нагрузки на трубопроводы (как правило, останов одной из промежуточных станций). Моделирование развития переходного процесса в течение времени, которое необходимо для достижения границ соседних станций, ограничивающих зону распространения ударной волны.

5. Прекращение процесса моделирования и получение в EXCEL-формате таблиц с параметрами давлений на трассе. Построение стандартными средствами и анализ графиков давлений с целью обнаружения нарушений пределов трассовых давлений.

Применение программного обеспечения «Димонт» в целях обучения диспетчерского персонала требует наличия методических материалов и набора контрольных заданий:

– для расчетов стационарных режимов и контроля применяемых методов повышения энергоэффективности технологического процесса трубопроводного транспорта нефти;

– моделирования переходных процессов и контроля применяемых методов повышения безопасности процессов;

– моделирования переходных процессов с применением управляющих действий обучаемого с целью выработки навыков управления в реальном масштабе времени.

Заключение

Блоки статических режимов и идентификации характеристик насосов и диаметров трубопроводов программной реализации гидродинамической модели участка нефтепровода показали высокую точность прогнозирования выходных откликов и основных параметров. Применение этих блоков рекомендуется на этапе проектирования основного оборудования и при оперативном управлении режимами для повышения энергоэффективности технологического процесса.

Блок переходных процессов моделирует достаточное число типичных ситуаций, и его использование целесообразно на стадии проектирования, модернизации и при подготовке диспетчерского персонала в целях повышения безопасности транспорта нефти.

Список литературы

1. Вайншток, С.М. Трубопроводный транспорт нефти : в 2 т. / С.М. Вайншток. – М. : ООО «Недра – Бизнесцентр», 2002–2004.

2. Максимей, И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И.В. Максимей. – М. : Радио и связь, 1989.

3. Шилько, С.В. Определение параметров вязкого течения нефти при действии противотурбулентных присадок / С.В. Шилько, Ю.Г. Кузьминский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 11. – С. 14–17.

4. Кузьминский, Ю.Г. Гидравлическое взаимодействие систем защит магистрального нефтепровода в переходных процессах / Ю.Г. Кузьминский, В.И. Вьюн // Безопасность и надежность трубопроводного транспорта : сб. науч. тр. – Новополоцк, 2003. – № 3. – С. 56–67.

5. Кузьминский, Ю.Г. Идентификация модели переходных процессов течения нефти в магистральных трубопроводах (реальный масштаб времени) / Ю.Г. Кузьминский, С.В. Шилько, В.И. Вьюн // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2006. – Т. 11, № 2. – С. 15–21.

6. Кузьминский, Ю.Г. Расчет гидравлических характеристик путем идентификации моделей насосных агрегатов и перекачивающих станций магистральных нефтепроводов / Ю.Г. Кузьминский, С.В. Шилько, В.И. Вьюн // Механика машин, механизмов и материалов. – 2008. – № 2. – С. 58–63.

7. Кузьминский, Ю.Г. Методы и средства контроля энергоэффективности трубопроводного транспорта нефти в реальном масштабе времени / Ю.Г. Кузьминский, В.И. Вьюн, А.А. Костюченко // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2007. – № 2. – С. 81–100.

8. Кузьминский, Ю.Г. Вопросы реализации волнового метода локализации утечек / Ю.Г. Кузьминский, В.И. Вьюн // Безопасность и надежность трубопроводного транспорта : сб. науч. тр. – Новополюк, 2008. – Вып. 5. – С. 224–231.

Поступила 16.04.08

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, ул. Кирова, 32^а
e-mail: shilko_mpri@mail.ru*

Yu.G. Kuzminsky, S.V. Shilko

A MATHEMATICAL MODEL OF THE PIPE OIL TRANSPORTATION PROCESS

An approach for modeling of hydrodynamic phenomena arising in pipe oil transportation technological process is described. The general equations, model parameters, software implementation and assessment of model adequacy are given.