ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.5.017

Е.Д. Агафонов, Ю.Н. Безбородов, А.Г. Миронов

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ MATLAB / SIMHYDRAULICS В ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

Пакет математических вычислений Matlab является стандартом при создании информационно-моделирующих и управляющих систем, для решения задач анализа данных и моделирования процессов в системах различной природы и назначения. Начиная с версии R2007a, в пакет Matlab входит инструмент SimHydraulics, позволяющий строить модели гидравлических систем с целью прогноза параметров или создания систем управления.

Одним из объектов, представляющим интерес при построении математических моделей, является магистральный нефтепровод. Магистральный нефтепровод состоит из следующих элементов: резервуарный парк, линейная часть, нефтеперекачивающие станции. Функционирование нефтепровода невозможно без расчета режимов его работы, которые тесно связаны с задачей обеспечения необходимых объемов перекачки нефти, предсказания энергопотребления для насосных агрегатов и др.

Модели нефтепровода в зависимости от их назначения, вариантов физического описания процессов и используемого математического аппарата делятся на различные классы. В большинстве случаев, отсутствие полной информации о характеристиках и параметрах процесса, неполнота сведений о перекачиваемой нефти, геометрической конфигурации трубопровода, о наличии местных сопротивлений, толщине отложений, характеристиках насосных агрегатов и так далее приводят к тому, что на практике при расчетах технологических режимов используются модели установившегося состояния в трубопроводе. Тем не менее, для решения задач моделирования протекания технологического процесса перекачки нефти, включая прогноз энергопотребления для насосных агрегатов, а также моделирование аварийных ситуаций, требуется синтез динамических (нестационарных) моделей магистрального трубопровода.

Инструмент SimHydraulics, входящий в среду моделирования динамических процессов Simulink пакета Matlab, позволяет осуществлять построение динамических моделей гидравлических систем. В нем реализован принцип визуального программирования, когда пользователь при помощи библиотеки графических объектов в окне модели может сконструировать принципиальную схему гидравлической системы. Каждый объект в модели имеет свои параметры и описывается соответствующим математическим оператором. При запуске процесса моделирования происходит макросинтез моделей и расчет оператора системы для заданного временного диапазона. Следить за откликом модели пользователь может с помощью блоков, позволяющих строить временные зависимости интересующих его переменных в реальном времени или же в ускоренном режиме.

При расчетах моделей SimHydraulics используются численные методы решения дифференциальных и алгебраических уравнений, входящих в оператор системы. Пользователь имеет возможность гибкого выбора среди множества методов, включая методы численного интегрирования различных порядков, в том числе для уравнений в частных производных и т.д.

Информационный поиск показал, что количество публикаций, в которых обсуждается технология моделирования гидравлических процессов с применением SimHydraulics, крайне мало. Так, например, в [1] описывается процесс построения модели гидропривода ковша автокрана. Вопросы моделирования магистральных трубопроводов с помощью SimHydraulics, в открытой печати отсутствуют. Поэтому представляется актуальным предложить подходы к адаптации этого вычислительного инструмента к задачам моделирования объектов трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов.

Для создания модели магистрального нефтепровода существует возможность использовать стандартные блоки пакета SimHydraulics: резервуары, трубы, обратные клапана, задвижки, насосы, источники постоянного давления и расхода, а так же датчики расхода и давления. Управление созданной моделью может осуществляться с помощью управляющих сигналов, подаваемых на управляющие элементы модели: задвижки, насосы.

Настройку модели магистрального трубопровода можно осуществить при помощи минимизации критериальных функций, характеризующих отклонение модельных траекторий с измеренными

Таблица 1. Соответствие вида эмпирической зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от диапазона числа Рейнольдса в системе SimHydraulics

Режим течения жидкости	Формула для расчета коэффициента гидравлического сопротивления при соответствующем режиме течения жидкости	Диапазон значений числа Рейнольдса для соответствующего режима течения
Ламинарный	$f = K_s / \mathrm{Re},$	$\mathrm{Re} \le \mathrm{Re}_L,$
Переходный	$f = f_L + \frac{f_T - f_L}{\mathrm{Re}_T - \mathrm{Re}_L}(\mathrm{Re} - \mathrm{Re}_L),$	$\mathrm{Re}_L < \mathrm{Re} < \mathrm{Re}_T,$
Турбулентный	$f = \left(-1.8 \log_{10} \left(\frac{6.9}{\mathrm{Re}} + \frac{r / D_H}{3.7} \right)^{1.11} \right)^{-2},$	$\mathrm{Re} \ge \mathrm{Re}_T$.

Таблица 2. Соответствие вида эмпирической зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от диапазона числа Рейнольдса в российских справочных изданиях

Режим течения жидкости	Формула для расчета коэффициента гидравлического сопротивления при соответствующем режиме течения жидкости	Диапазон значений числа Рейнольдса для соответствующего режима течения
Ламинарный	$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}},$	$\mathrm{Re} < 2320,$
Переходный турбулентный	$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}(1-\gamma) + \frac{0.3164}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}\gamma,$	$2320 \le \mathrm{Re} < 10000,$
Развитый турбулентный	$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}},$	$10000 < \mathrm{Re} < \frac{27}{\varepsilon^{1.141}},$
Зона смешанного трения	$\lambda = 0.11\left(\varepsilon + \frac{64}{\mathrm{Re}} \right)^{1/4},$	$\frac{27}{\varepsilon^{1.141}} < \mathrm{Re} < \frac{500}{\varepsilon},$
Зона квадратичного трения	$\lambda = 0.11\varepsilon^{1/4},$	$\mathrm{Re} > \frac{500}{\varepsilon}.$

значениями. Оптимизация осуществляется с применением встроенных в Matlab алгоритмов: генетические алгоритмы, алгоритмы прямого поиска и т.д. Также существует возможность интеграции в систему пользовательских инструментов оптимизации.

Основными элементами линейной части магистрального нефтепровода являются трубы. Модели труб учитывают геодезические отметки, сжимаемость жидкости из-за содержания растворенных газов и коэффициент гидравлического сопротивления. Коэффициент сопротивления в системе вычисляется по формулам, представленным в таблице 1 [2].

В табл. 1 приняты следующие обозначения: r – абсолютная шероховатость; D_H – внутренний диаметр трубопровода; K_s – коэффициент, характеризующий сечение трубы (для круглого сечения всегда $K_s = 64$); Re_L и Re_T – числа Рейнольдса при ламинарном и турбулентном режимах соответственно, по умолчанию $\mathrm{Re}_L = 2000$, а $\mathrm{Re}_T = 4000$; f_T и f_L – коэффициенты трения при турбулентном и ламинарном режимах соответственно.

Необходимо отметить, что в учебных и научных публикациях в России обычно используются другой набор формул, представленный в табл.2 [3].

В табл. 2 приняты следующие обозначения: $\gamma = 1 - e^{-0.002(\mathrm{Re}-2320)}$ – коэффициент перемежаемости; Δ – абсолютная шероховатость; $\varepsilon = \Delta / D$ – относительная шероховатость внутренней поверхности трубопровода; D – внутренний диаметр трубопровода.

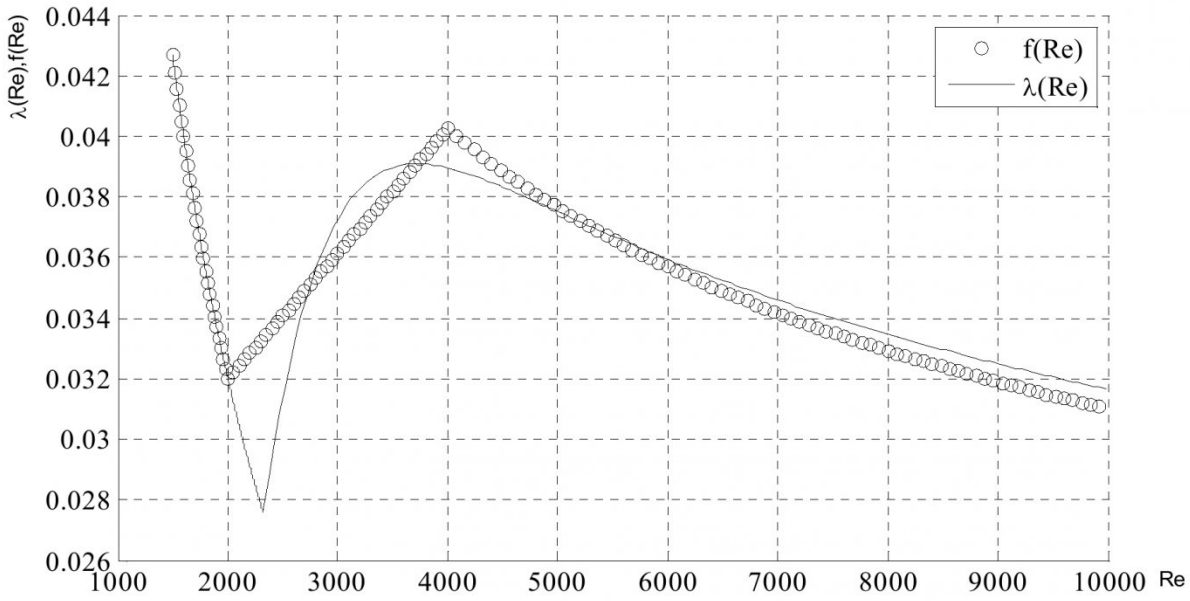

Рис.1. Зависимость $\lambda(\mathrm{Re})$ *и* $f(\mathrm{Re})$ *для узкого диапазона изменения* Re

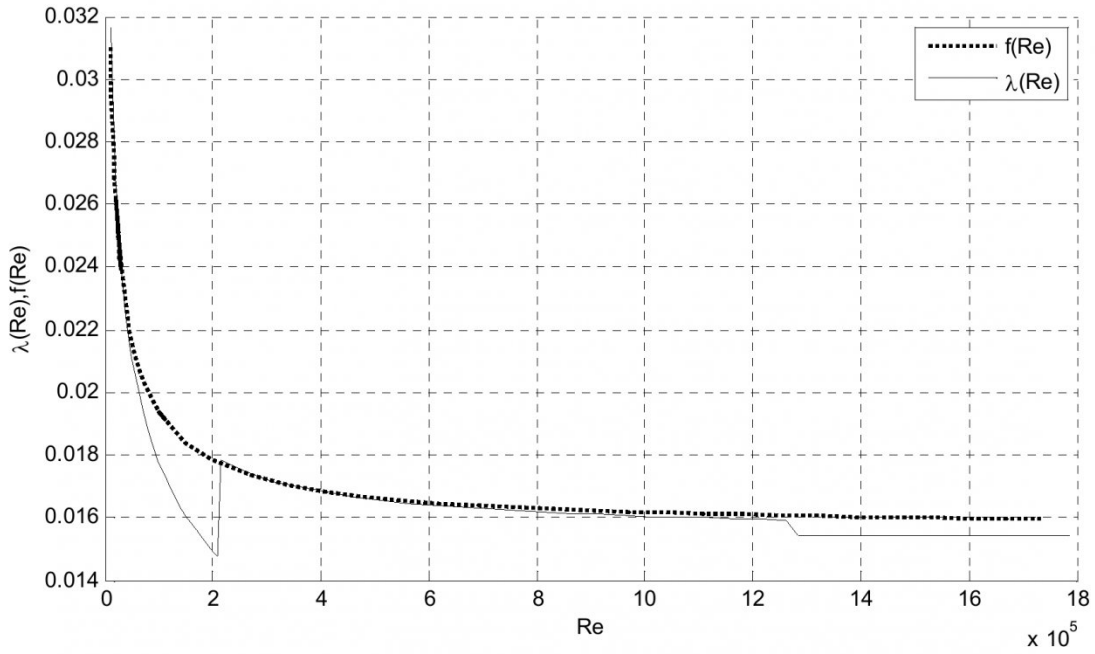

Рис.2. Зависимость $\lambda(\mathrm{Re})$ *и* $f(\mathrm{Re})$ *для широкого диапазона изменения* Re

На рис. 1 представлены функции зависимости коэффициента трения от числа Рейнольдса и внутренней шероховатости $f(\mathrm{Re},\varepsilon)$, $\lambda(\mathrm{Re},\varepsilon)$ для узкого диапазона изменения Re, на рис. 2 оба набора функций гидравлического сопротивления изображены для широкого диапазона Re.

Управление моделью в SimHydraulics осуществляется с помощью сигналов, подаваемых на блоки исполнительных механизмов: насосы, источники давления, источник вращательного движения для ротора насоса и т.д. В гидравлике, особенно при описании трубопроводных систем, часто приходится иметь дело с напорными характеристиками, однако SimHydraulics оперирует давлениями. Вследствие этого при подаче сигнала на источник давления, его необходимо преобразовать из напора в давление, умножив его на плотность и ускорение силы тяжести:

$$p = \rho g h, \quad h = \frac{p}{\rho g}. \qquad (1)$$

где g – ускорение силы тяжести; h – измеряемый напор или напор, который необходимо создать в трубопроводе; ρ – плотность жидкости; p – измеряемое давление или давление которое необходимо создать в трубопроводе.

Преобразования (1) осуществляются последовательностью блоков, соединенных между собой (рис. 3).

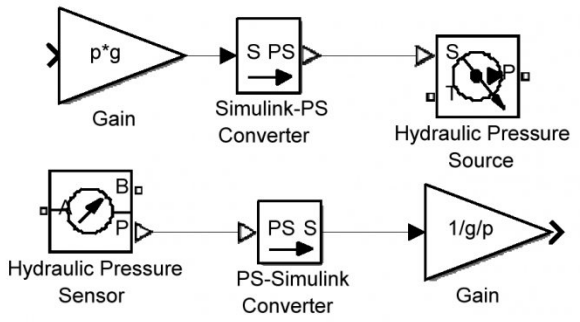

Рис.3. Блоки преобразования напора в давление и наоборот

Блок *Gain* осуществляет умножение сигнала на константу, *PS-Simulink_Converter* конвертирует физические величины в числовые, *Simulink-PS_Converter* выполняет обратную конвертацию, *Hydraulic_Pressure_Sensor* позволяет определить разницу давлений между входными портами, *Hydraulic_Pressure_Source* задает дифференциальное давление между входными портами.

Система SimHydraulics предусматривает расчет объемного расхода в секунду, на практике чаще используют объемный расход в час. Для перерасчета объемного расхода необходимо умножить или разделить его на 3600 (рис.4):

$$Q = 3600 \cdot q, \quad q = \frac{Q}{3600},$$

где Q – объемный расход используемый в практике (м^3/ч), q – объемный расход, которым оперирует SimHydraulics (м^3/с).

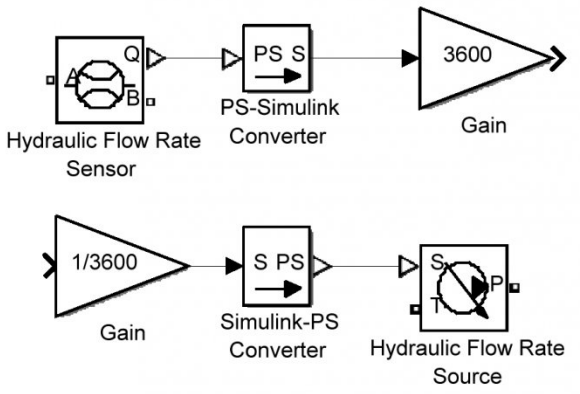

Рис.4. Перерасчет объемного расхода

Модель центробежных насосов настаиваются по данным, полученным экспериментальным путем. Для аппроксимации напорной (Q-H) и (Q-N) характеристик необходимо произвести перерасчет с напора в давление и объемный расход из м^3/час перевести в м^3/с. SimHydraulics автоматически аппроксимирует характеристику насоса линейной, кубической функцией, либо кубическими сплайнами. Недостаток принятой модели насоса заключается в том, что отсутствует возможность построить графики аппроксимационных кривых, следовательно, невозможно оперативно узнать, является ли величина $\eta(Q)$ наибольшей [3].

Режим работы центробежных насосов нередко регулируется с помощью изменения частоты, насос меняет свои характеристики согласно следующим формулам подобия [4]:

$$q = q_{ref}\frac{\omega}{\omega_{ref}},\ p = p_{ref}\left(\frac{\omega}{\omega_{ref}}\right)^2\frac{\rho}{\rho_{ref}},$$

$$N = N_{ref}\left(\frac{\omega}{\omega_{ref}}\right)^3\frac{\rho}{\rho_{ref}}.$$

где ω_{ref} – частота, при которой производились испытания насоса; ω – частота, подаваемая на насос при его эксплуатации; q_{ref} – расходная характеристика полученная экспериментальным путем; q – вычисляемая расходная характеристика; p_{ref} – дифференциальное давление, создаваемое насосом, во время испытаний; p – дифференциальное давление вычисляемое аналитически; N_{ref} – мощностная характеристика полученная экспериментальным путем; N – мощностная характеристика, вычисляемая с помощью формулы подобия; ρ_{ref} – плотность при которой производились испытания насоса; ρ – плотность при которой происходит эксплуатация насоса.

В SimHydraulics модель насоса должна взаимодействовать с моделью ротора. Модель ротора можно собрать из стандартных блоков и при необходимости добавить в неё инерцию и силу трения.

В трубопроводах часто используются разветвления, в модели SimHydraulics ветвление осуществляется блоком *T-junction*, основные параметры которого – это диаметр основной трубы и диаметр ответвления. При необходимости существует возможность в блоке задать параметры, которые будут частично ограничивать расход жидкости по различным направлениям ветвления.

В SimHydraulics присутствуют широкие возможности использовать в гидравлических моделях разнообразную управляющую аппаратуру. Зависимость истечения жидкости через управляющую аппаратуру описывается теми же уравнениями что и через блоки моделей отверстия, образовавшиеся в трубопроводе, вследствие нарушения герметичности трубопровода [5]:

$$q = \begin{cases} C_D \cdot A\sqrt{\dfrac{2}{\rho}|p|}\cdot sign(p), & \mathrm{Re} \ge \mathrm{Re}_{\mathrm{cr}}, \\ 2C_{DL}\cdot A\dfrac{D_H}{\nu\rho}p, & \mathrm{Re} < \mathrm{Re}_{\mathrm{cr}}, \end{cases}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{qD_H}{A(h)\nu},$$

$$D_H = \sqrt{\frac{4A(h)}{\pi}}, C_{DL} = \left(\frac{C_D}{\sqrt{\mathrm{Re}_{cr}}}\right)^2.$$

где A_{leak} – минимальная площадь, через которую протекает жидкость; $A(h)$ – мгновенная площадь проходного отверстия; C_D – коэффициент расхода; Re_{cr} критическое число Рейнольдса, при котором жидкость из ламинарного режима переходит турбулентный, по умолчанию $\mathrm{Re}_{cr} = 12$, что соответствует круглым отверстиям с острыми краями.

В российских справочных изданиях истечение жидкости из отверстий считается аналогично для ламинарного течения, турбулентный режим, как правило, не учитывается [3].

Каждая физическая модель должна содержать блок *Solver_Configuration*, описывающий необходимые параметры для моделирования. В SimHydraulics присутствует блок содержащий информацию о параметрах жидкости, используемой в модели – *Hydraulic_Fluid*. В SimHydraulics есть допущение, что каждая модель работает только с одним видом жидкости, поэтому каждая гидравлическая модель, в том числе модель магистрального трубопровода, должна содержать только один блок *Hydraulic_Fluid*.

Кроме описанных возможностей SimHydraulics, необходимо отметить возможность учета в модели инерции жидкости и термодинамических процессов в трубопроводе.

Представим пример участка гидравлической сети (рис.5).

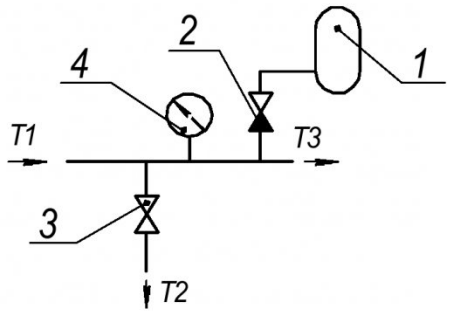

Рис.5. Участок гидравлической сети: 1 – резервуар; 2 – обратный клапан; 3 – задвижка; 4 – манометр; T1 – подача жидкости в главный трубопровод; T2 – истечение жидкости из отвода; T3 – истечение жидкости из главного трубопровода

На рис. 6 изображена реализация участка гидравлической сети, построенной в SimHydraulics. Модель состоит из главного трубопровода с ответвлением. Через 200 секунд после начала работы задвижка мгновенно перекрывает подачу жидкости в ответвление, в результате чего давление в главном трубопроводе резко возрастает и образуется волна избыточного давления. При повышении давления обратный клапан открывается и происходит гашение волны избыточного давления.

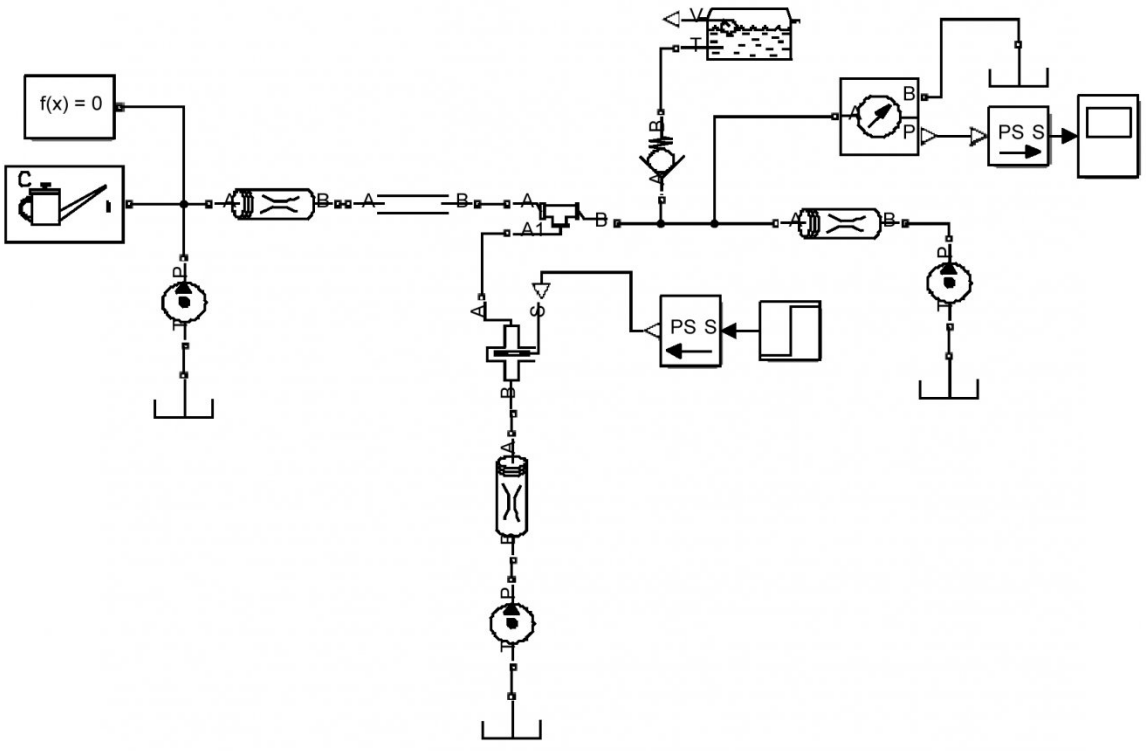

Рис.6. Гидравлическая схема, собранная в SimHydraylics

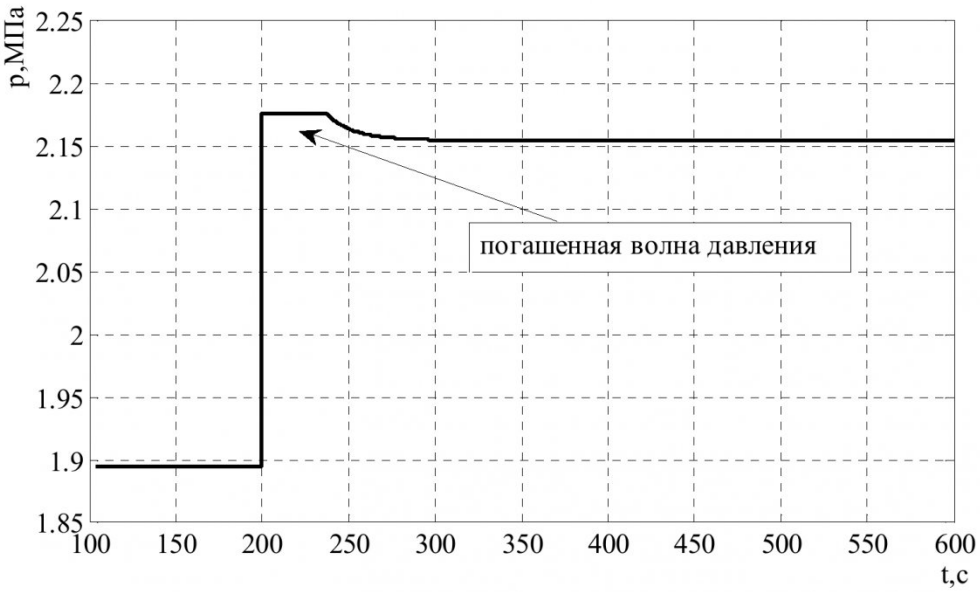

Рис.7. Расчетная зависимость давления в в главном трубопроводе

На рис.7 показана расчетная зависимость изменения давления в главном трубопроводе.

Таким образом, в статье были обсуждены некоторые особенности использования системы Matlab/SimHydraulics при построении динамических моделей процессов в магистральном нефтепроводе. Выбранный инструмент предоставляет широкие возможности и гибкость в построении моделей. Методика расчетов отличается от принятой в России, тем не менее, в случае решения тестовых задач отклонение результатов расчета является незначительным.

Динамический характер моделей определяется сжимаемостью жидкости и её инерцией. На сегодняшний день отсутствует возможность моделирования распределенных процессов в частных производных в трубопроводе. Модели труб не учитывают эффектов сжатия и растяжения при больших давлениях. Модели насосов не учитывают влияние вязкости перекачиваемой жидкости на их гидравлические характеристики.

Для введения в модель магистрального нефтепровода отсутствующего функционала требуется модификация существующих и создание новых блоков, позволяющих устранить описанные недостатки. Дальнейшая работа будет направлена на создание дополнительной библиотеки функциональных блоков, позволяющих учитывать факторы, имеющие важное значения в процессе создания модели магистрального нефтепровода, недоступные в блоках стандартных библиотек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Руппель, А.А.* Моделирование гидравлических систем в Matlab : учебное пособие / А.А. Руппель, А.А. Сагандыков, М.С. Корытов - Омск.: СибАДИ, 2009. - 172 с.

2. *White, F.M.* Viscous Fluid Flow. McGraw-Hill, 1991.

3. *Васильев Г.Г.* Трубопроводный транспорт нефти: учеб. для вузов, Т.1 / Г.Г. Васильев, Г.Е. Коробков, А.А. Коршак [и др.]. - М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2002. - 407 с.

4. *Hicks, T.G.* Pump Application Engineering / T.G. Hicks, T.W. Edwards. McGraw-Hill, NY, 1971.

5. Constant Area Hydraulic Orifice // MathWorks Documentation Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mathworks.com/help/physmod/hydro/ ref/fixedorifice.html [08.12.13].

Авторы статьи

Агафонов
Евгений Дмитриевич,
к.т.н., доц. каф. топливообеспечения и горюче-смазочных материалов (Сибирский федеральный университе», Институт нефти и газа)
тел. 8-913-5199974,
E-Mail: agafonov@gmx.de

Безбородов
Юрий Николаевич,
д.т.н., профессор, зав. каф. топливообеспечения и горюче-смазочных материалов (Сибирский федеральный университет , Институт нефти и газа),
E-Mail: labsm@mail.ru

Миронов
Александр Геннадьевич,
студент (Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа),
тел. 8-965-8986904, E-Mail:
surka2012@yandex.ru