

## 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 библио-

теки 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 клапаны, 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	$f = K_s / \text{Re}$ ,	$\text{Re} \leq \text{Re}_L$ ,
Переходный	$f = f_L + \frac{f_T - f_L}{\text{Re}_T - \text{Re}_L} (\text{Re} - \text{Re}_L)$ ,	$\text{Re}_L < \text{Re} < \text{Re}_T$ ,
Турбулентный	$f = \left( -1.8 \log_{10} \left( \frac{6.9}{\text{Re}} + \frac{r/D_H}{3.7} \right) \right)^{-2}$ ,	$\text{Re} \geq \text{Re}_T$ .

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	$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$ ,	$\text{Re} < 2320$ ,
Переходный турбулентный	$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} (1 - \gamma) + \frac{0.3164}{\sqrt[4]{\text{Re}}} \gamma$ ,	$2320 \leq \text{Re} < 10000$ ,
Развитый турбулентный	$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{\text{Re}}}$ ,	$10000 < \text{Re} < \frac{27}{\varepsilon^{1.141}}$ ,
Зона смешанного трения	$\lambda = 0.11 \left( \varepsilon + \frac{64}{\text{Re}} \right)^{1/4}$ ,	$\frac{27}{\varepsilon^{1.141}} < \text{Re} < \frac{500}{\varepsilon}$ ,
Зона квадратичного трения	$\lambda = 0.11 \varepsilon^{1/4}$ ,	$\text{Re} > \frac{500}{\varepsilon}$ .

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, харак-

теризующий сечение трубы (для круглого сечения всегда  $K_s = 64$ );  $\text{Re}_L$  и  $\text{Re}_T$  – числа Рейнольдса при ламинарном и турбулентном режимах соответственно, по умолчанию  $\text{Re}_L = 2000$ , а  $\text{Re}_T = 4000$ ;  $f_T$  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:  $\gamma = 1 - e^{-0.002(\text{Re}-2320)}$  – коэффициент перемежаемости;  $\Delta$  – абсолютная шероховатость;  $\varepsilon = \Delta / D$  – относительная шероховатость внутренней поверхности трубопровода;  $D$  – внутренний диаметр трубопровода.

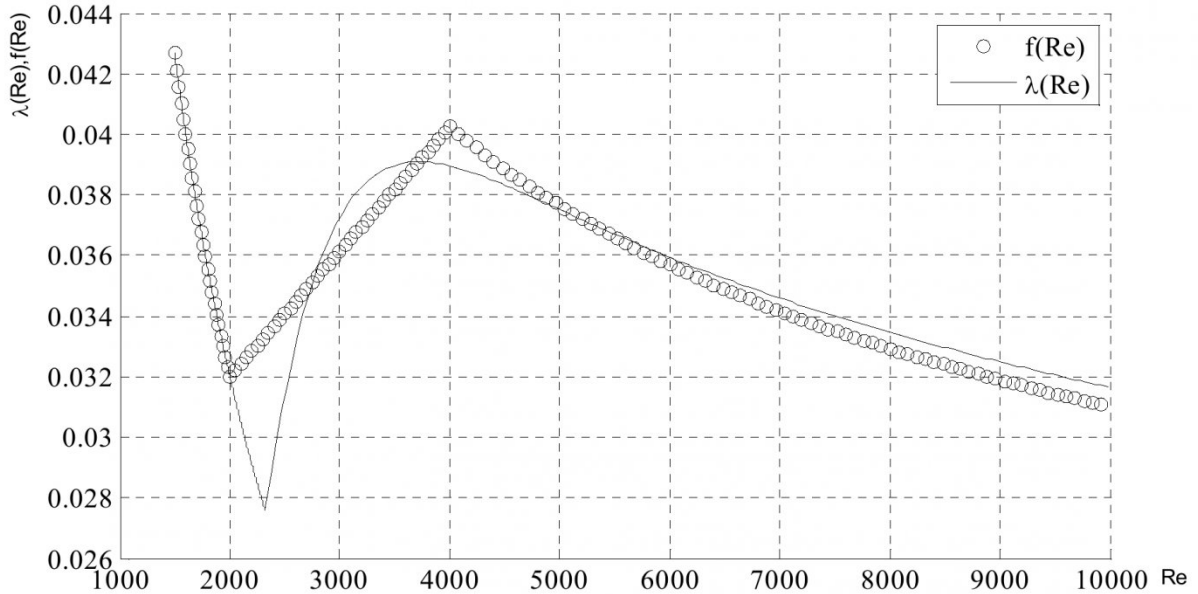


Рис.1. Зависимость  $\lambda(\text{Re})$  и  $f(\text{Re})$  для узкого диапазона изменения  $\text{Re}$

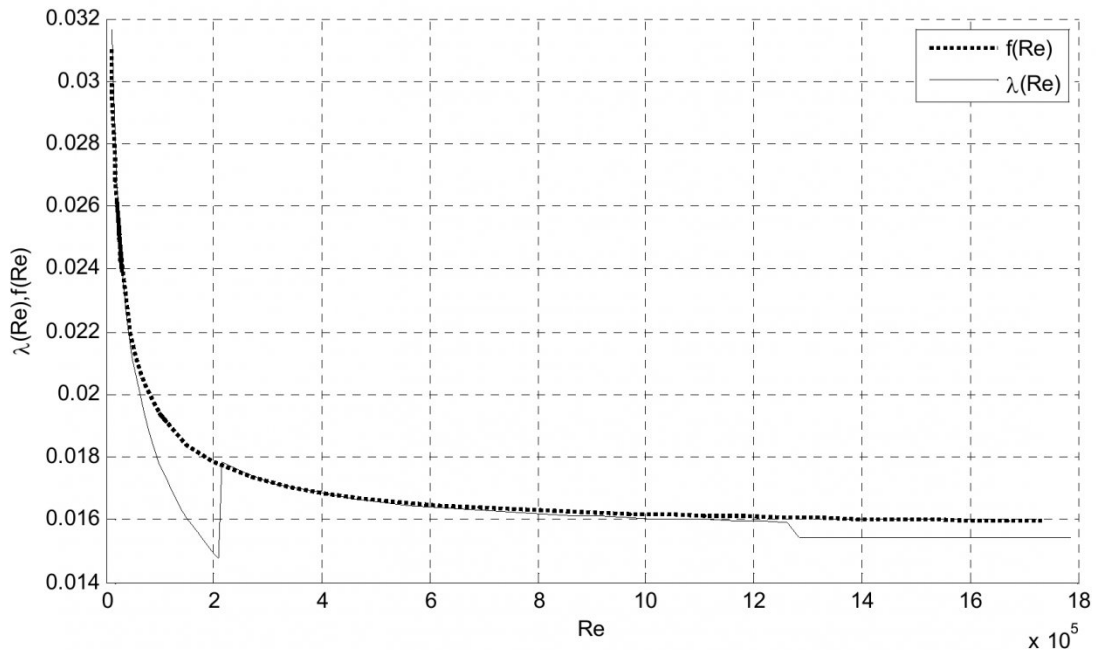


Рис.2. Зависимость  $\lambda(\text{Re})$  и  $f(\text{Re})$  для широкого диапазона изменения  $\text{Re}$

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

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:

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

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

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

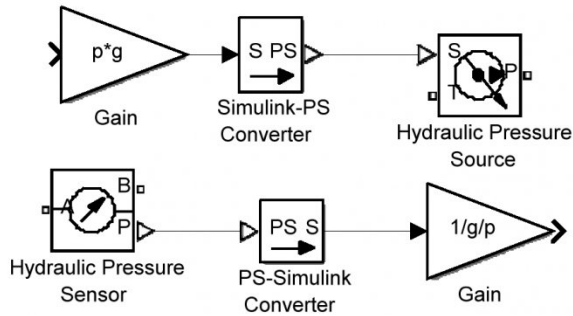


Рис.3. Блоки преобразования напора в давление и наоборот

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 ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ),  $q$  – объемный расход, которым оперирует SimHydraulics ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

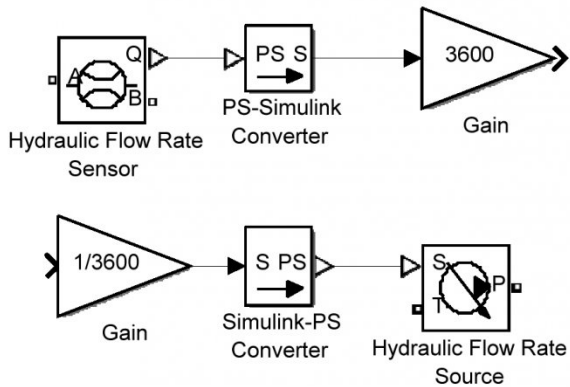


Рис.4. Перерасчет объемного расхода

Модель центробежных насосов настраиваются 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  $\text{м}^3/\text{час}$  перевести в  $\text{м}^3/\text{с}$ . SimHydraulics автоматически аппроксимирует характеристику насоса линейной, кубической функцией, либо кубическими сплайнами. Недостаток принятой модели насоса заклю-

чается 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 подобию [4]:

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

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

где  $\omega_{ref}$  – частота, при которой производились испытания насоса;  $\omega$  – 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 подобию;  $\rho_{ref}$  – плотность при которой производились испытания насоса;  $\rho$  – 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]:

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

$$\text{Re} = \frac{q D_H}{A(h) \nu},$$

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

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  $Re_{cr} = 12$ , 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).

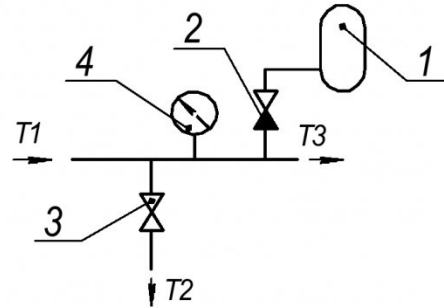


Рис.5. Участок гидравлической сети:  
1 – резервуар; 2 – обратный клапан; 3 – задвижка;  
4 – манометр; T1 – подача жидкости в главный трубопровод; T2 – истечение жидкости из отвода; T3 – истечение жидкости из главного трубопровода

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.

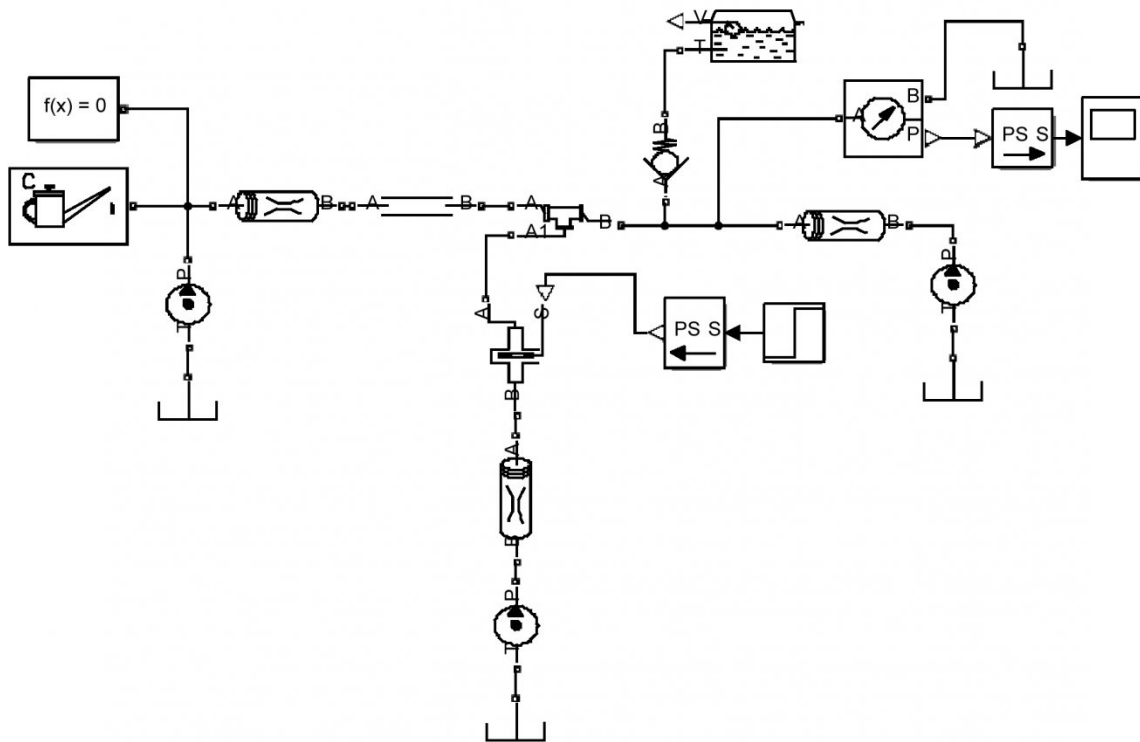


Рис.6. Гидравлическая схема, собранная в SimHydraulics



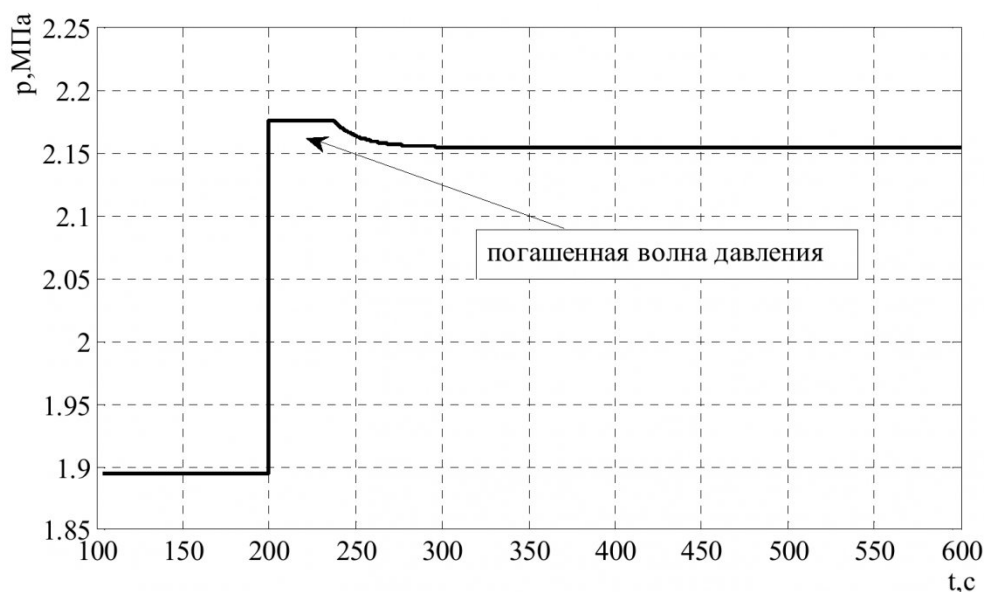


Рис.7. Расчетная зависимость давления в в главном трубопроводе

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 произ-

водных 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. топливо-  
обеспечения и горюче-  
смазочных материалов ( Сибир-  
ский федеральный университе-  
т, Институт нефти и газа)  
тел. 8-913-5199974,  
E-Mail: [agafonov@gmx.de](mailto:agafonov@gmx.de)

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

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