

## О ПРОБЛЕМЕ УЧЕТА ВЯЗКОСТИ В МОДЕЛЯХ ТРУБОПРОВОДОВ В ПАКЕТЕ MATLAB/SIMSCAPE

Миронов А.Г.

научный руководитель канд. техн. наук Агафонов Е.Д.  
*Сибирский федеральный университет*

На сегодняшний день существует необходимость создания моделей магистральных трубопроводов, с целью прогноза гидравлических, энергетических и прочих параметров, управления процессами перекачки, обеспечения безопасности перекачки. Существует множество инструментов позволяющих строить такие модели, в том числе программный инструмент Simscape, входящий в состав пакета MATLAB. Исследованию возможностей упомянутого инструментального средства посвящено множество работ, в том числе [3, 4].

Simscape позволяет с применением средств визуального программирования составлять из графических объектов (блоков) схемы гидравлических сетей, задавать их параметры, осуществлять расчет основных гидравлических характеристик в динамическом режиме. Блоки, доступные в стандартной библиотеке, включают модели гидравлических элементов (насосы, запорная и регулирующая арматура, трубы, тройники и так далее), а также измерительных и вспомогательных систем. Зачастую набор и функциональное содержание стандартных блоков являются недостаточными для учета некоторых явлений в трубопроводе. Так, например, стандартная модель центробежного насоса в Simscape не учитывает влияния вязкости на характеристики насоса. С ростом вязкости перекачиваемой жидкости гидравлические характеристики центробежных насосов в значительной степени изменяются. Вследствие этого, необходимо выявить возможности коррекции моделей насосов при изменении вязкости перекачиваемой жидкости, разработать дополнительный блок Simscape для пересчета паспортных характеристик основных и подпорных насосов (напора, подачи, КПД, мощности), приведенных заводом-изготовителем, с воды на вязкую нефть [2; с. 91-94].

Характеристики центробежных насосов (напора, подачи, КПД), рассчитанные на воде, обычно заменяют их квадратическими аппроксимациями [1; с. 131-133]. Расходно-напорная характеристика и характеристика КПД для магистральных насосов соответственно рассчитываются по формулам:

$$H_1 = H_B - b_B \cdot Q^2, \quad (1)$$

$$\eta_1 = c_{OB} + c_{1B} \cdot Q + c_{2B} \cdot Q^2, \quad (2)$$

где  $H_1$ ,  $\eta_1$  – напор и КПД насоса при подаче  $Q$ ;  $H_B$ ,  $b_B$ ,  $c_{OB}$ ,  $c_{1B}$ ,  $c_{2B}$  – эмпирические коэффициенты для аппроксимации характеристик насоса, измеренных на воде. КПД для подпорных насосов рассчитывается аналогично, как и для магистральных насосов, а напорная характеристика выражается уравнением (3):

$$H_1 = H_B + a_B \cdot Q - b_B \cdot Q^2. \quad (3)$$

Перерасчет гидравлических характеристик насоса с воды на вязкую нефть необходим, если число Рейнольдса в насосе  $Re_H$  меньше переходного числа Рейнольдса, т.е.  $Re_H < Re_{II}$ , где

$$\text{Re}_H = \frac{n \cdot D_2^2}{\nu}, \quad (4)$$

$$\text{Re}_H = 0,316 \cdot 10^5 \cdot n_s^{-0,305}. \quad (5)$$

где  $n$  – угловая скорость вращения ротора насоса;  $D_2$  наружный диаметр рабочего колеса;  $\nu$  – вязкость перекачиваемой жидкости;  $n_s$  – коэффициент быстроходности.

Перерасчет КПД с воды на вязкую нефть необходим если число Рейнольдса в насосе  $\text{Re}_H$  меньше граничного числа Рейнольдса  $\text{Re}_{Гр}$  т.е.  $\text{Re}_H < \text{Re}_{Гр}$ , где

$$\text{Re}_{Гр} \approx 0,224 \cdot 10^5 \cdot n_s^{0,384}. \quad (6)$$

Коэффициенты перерасчета напора  $k_H$ , подачи  $k_Q$  и КПД насоса  $k_\eta$  с воды на вязкую нефть рассчитываются в соответствии со следующими уравнениями:

$$k_H = 1 - 0,128 \cdot \lg\left(\frac{\text{Re}_H}{\text{Re}_{Гр}}\right), \quad (7)$$

$$k_\eta = 1 - \alpha_\eta \cdot \lg\left(\frac{\text{Re}_{Гр}}{\text{Re}_H}\right), \quad (8)$$

$$k_Q = k_H^{1,5}. \quad (9)$$

где  $\alpha_\eta$  – поправочный коэффициент:

$$\alpha_\eta = 1,33 \cdot n_s^{-0,326}. \quad (10)$$

Характеристики подпорного насоса, рассчитанные на воде, пересчитываются в соответствии с уравнениями (11), (12):

$$H_2 = H_B \cdot k_H + a_B \cdot \frac{k_H}{k_Q} - b_B \cdot \frac{k_H}{k_Q^2} \cdot Q^2, \quad (11)$$

$$\eta_2 = k_\eta \cdot c_{OB} + c_{1B} \cdot \frac{k_\eta}{k_Q} \cdot Q + c_{2B} \cdot \frac{k_\eta}{k_Q^2} \cdot Q^2. \quad (12)$$

Для магистральных насосов коэффициент для аппроксимации  $a_B$  равен нулю.

Используя язык Simscape [5], создадим блок для учета вязкости нефти для центробежного насоса (рисунок 1).



Рисунок 1 – Блок, учитывающий вязкость насосов

Данный блок будет корректировать характеристики модели стандартного насоса библиотеки SimHydraulics на величину  $\Delta\eta$  и  $\Delta H$  при увеличении вязкости, в соответствии со следующими формулами:

$$\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2 = [c_{OB} + c_{1B} \cdot Q + c_{2B} \cdot Q^2] - \left[ k_\eta \cdot c_{OB} + c_{1B} \frac{k_\eta}{k_Q} \cdot Q + c_{2B} \cdot \frac{k_\eta}{k_Q^2} \cdot Q^2 \right], \quad (13)$$

$$\Delta H = H_1 - H_2 = H_B + a_B - b_B \cdot Q^2 - \left( H_B \cdot k_H + a_B \cdot \frac{k_H}{k_Q} - b_B \cdot \frac{k_H}{k_Q^2} \cdot Q^2 \right). \quad (14)$$

Используя данный блок, составим участок гидравлической цепи (рисунок 2).

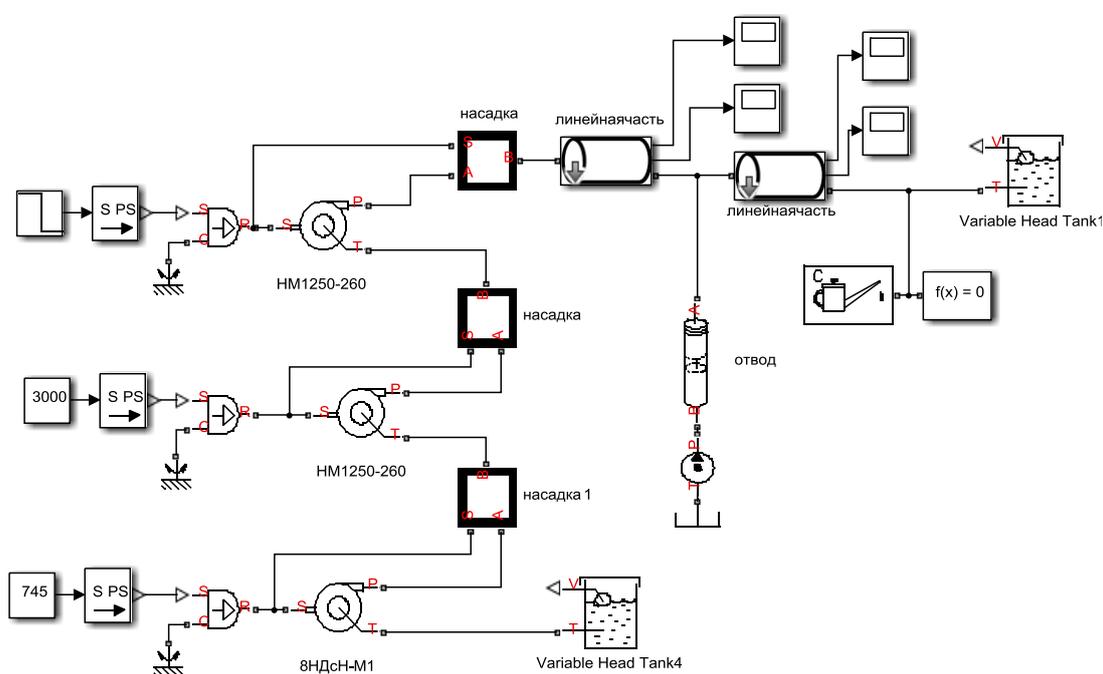


Рисунок 2 - Участок гидравлической цепи с блоком, учитывающим вязкость жидкости

Данный участок состоит из двух резервуаров соединенный трубопроводом длиной 150 км. Перекачка жидкости (200 сСт, 830 кг/м<sup>3</sup>) осуществляется тремя насосами: два НМ1250-260 и подпорный насос 20НДсН-М. В сечении  $x = 100$  км к трубопроводу присоединён отвод диаметром 300 мм и длиной 4 км.

Представим график зависимости давления в участке трубопровода от времени и сечения трубопровода (рисунок 3).

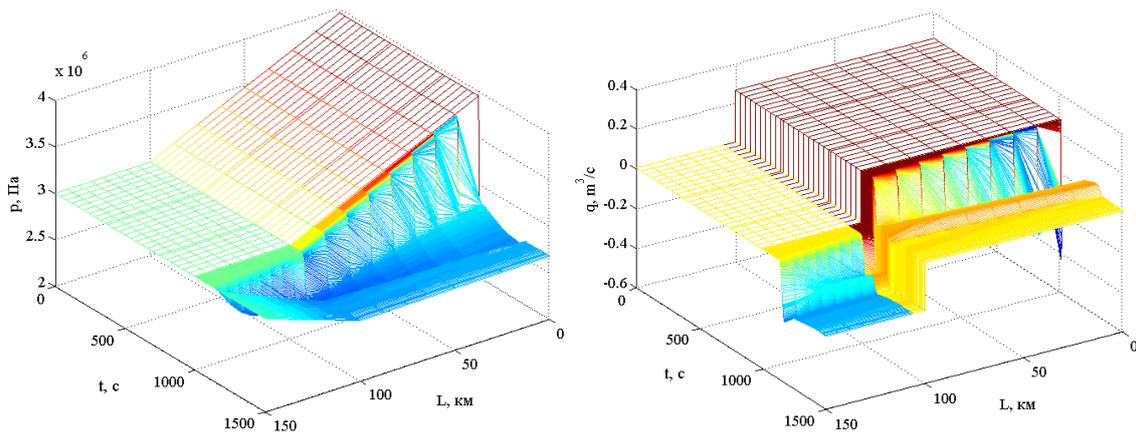


Рисунок 3 – График зависимости давления (слева) и расхода (справа) от времени и координаты трубопровода

Симуляция была начата с установившегося режима, в связи, с чем давление линейно падает и расход постоянный. В момент времени 1000 секунд, отключается один из насосов, происходит переходный процесс, в результате которого давление и расход падают. Так же из графика видно, что давление на участке 100-150 км не изменяется, так вся жидкость вытекает в ответвление с низким давлением.

На рисунке 4 изображены временные зависимости давлений после насосов, без учета и с учетом вязкости жидкости.

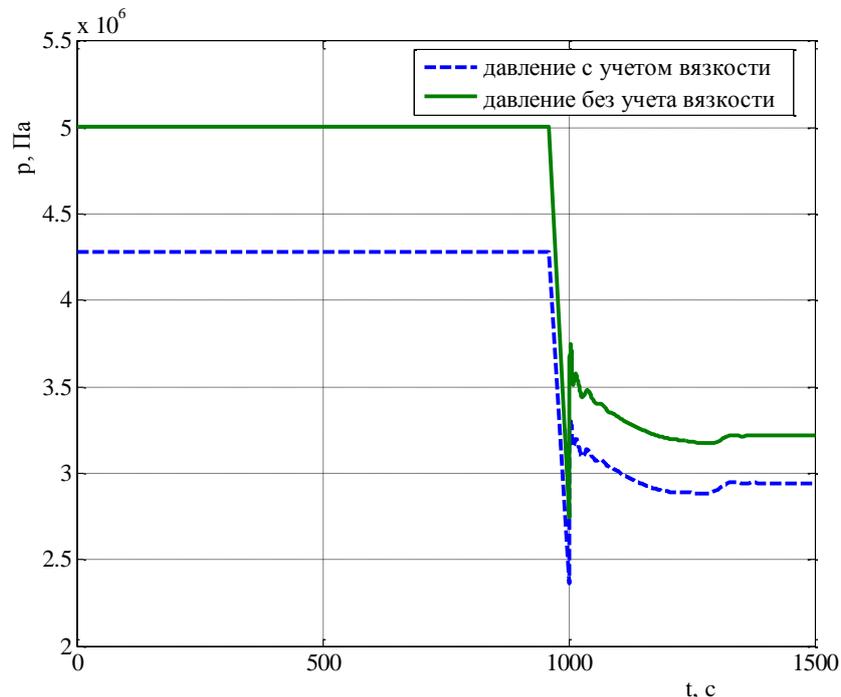


Рисунок 4 – Временные зависимости давлений после насосов, без учета и с учетом вязкости жидкости.

Таким образом, в настоящей работе построена модель в Simscape для гидравлических характеристик насосов с учетом вязкости, а также гидравлические характеристики линейной части трубопровода. Создан пользовательский блок,

позволяющий учитывать влияние вязкости на характеристики подпорных и магистральных насосов. Используя этот блок, удалось повысить точность расчета гидравлических характеристик участка трубопровода с двумя магистральными и одним подпорным насосами приблизительно на 11%. Увеличение количества насосов в модели увеличивает эффект от использования представленной в работе модели.

Дальнейшие исследования планируется посвятить адаптации инструмента Simscape для моделирования последовательной перекачки нефтепродуктов и рассмотреть особенности применения принципов термогидравлики в Matlab/Thermal Liquid.

### Список используемой литературы

1. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов: Учебное пособие для вузов/ А.А. Коршак, А.М. Шаммазов, П.И. Тугунов, В.Ф. Новоселов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2008. – 658 с.

2. Трубопроводный транспорт нефти: учеб: Учебное пособие для вузов / Г.Г. Васильев, Г.Е. Коробков, А.А. Коршак и др. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. - 407с.

3. D. Himr. Numerical simulation of water hammer in low pressurized pipe: comparison of SimHydraulics and Lax-Wendroff method with experiment / D. Himr: EPJ Web of Conferences, 2013.

4. Lumir Hruzik. Non-stationary flow of hydraulic oil in long pipe: Non-stationary flow of hydraulic oil in long pipe / Lumir Hruzik, Adam Burecek, and Martin Vasina // Non-stationary flow of hydraulic oil in long pipe: Non-stationary flow of hydraulic oil in long pipe: EPJ Web of Conferences, 2014.

Simscape Language Guide // MathWorks. PDF Documentation for Simscape. – 2014. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://www.mathworks.de/help/pdf\\_doc/physmod/simscape/simscape\\_lang.pdf](http://www.mathworks.de/help/pdf_doc/physmod/simscape/simscape_lang.pdf) (дата обращения 01.05.2014).