

На правах рукописи

**Золотов Игорь Олегович**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ  
ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯХ НА  
МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДАХ**

Специальность 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре «Техническая кибернетика» ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Научный доктор технических наук  
руководитель: **Лосенков Александр Станиславович**

Официальные **Жмур Владимир Владимирович,**  
оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, Институт  
Океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук  
(ИОРАН), заведующий лабораторией морских течений

**Собачкин Александр Александрович,**  
кандидат физико-математических наук, Ментор Графикс  
Девелопмент Сервисез Лимитед, директор

Ведущая ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по  
организация: проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС  
России» (федеральный центр науки и высоких технологий)

Защита состоится 22 марта 2013 года в 10 часов на заседании диссертационного  
совета Д212.125.14 при ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)» по адресу:  
125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский  
авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Автореферат разослан «        » февраля 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент

Гидаспов В.Ю.

## Общая характеристика работы

**Актуальность** темы диссертации обусловлена постоянным развитием трубопроводного транспорта, повышением сложности алгоритмов автоматического управления и требований к безопасности перекачки. В таких условиях все большее внимание уделяется математическому моделированию гидравлических процессов перекачки. Несмотря на наличие работ в области расчетов нестационарных процессов в трубопроводах, в подавляющем большинстве из них в качестве замыкания расчетной математической модели используют гипотезу квазистационарности, предложенную С.А. Христиановичем. Согласно этой гипотезе напряжение трения на стенке трубы зависит только от величины мгновенной средней скорости и эта зависимость имеет тот же вид, что и при установившемся течении. В то же время существуют теоретические и экспериментальные работы, указывающие на отличие гидравлического сопротивления от квазистационарного значения для случая нестационарного течения жидкостей в каналах. Качественное и количественное влияние нестационарности на гидравлическое сопротивление во время переходных процессов, возникающих в нефтепроводе при типовых технологических переключениях, остается слабо изучено. По этим причинам актуальность имеют исследования отклонений от квазистационарных зависимостей во время переходных процессов, возникающих в процессе пуска, изменения производительности, остановки перекачки нефтепровода, и создание математической модели расчета таких течений. Также при использовании построенной модели в составе программно-технических средств автоматизации, работающих в режиме реального времени, актуальность приобретают задачи настройки, адаптации, оценки погрешности расчета модели.

**Целью настоящей работы является:** выбор и усовершенствование методов расчета течения жидкости в цилиндрических трубах для построения математической модели расчета нестационарных процессов, возникающих при типовых технологических переключениях на магистральных нефтепроводах (МН), а также применение полученной модели для создания программного комплекса поддержки принятия решения, проводящего сравнение фактических и расчетных параметров перекачки в режиме реального времени.

### **Основные решаемые задачи:**

1) Разработать физико-математическую модель расчета нестационарного течения жидкости в разветвленной трубопроводной системе, содержащей основные технологические элементы, встречающиеся на магистральных нефтепроводах.

2) Провести теоретические и экспериментальные исследования процесса разгонного течения в протяженном трубопроводе, начинающегося из состояния покоя. На основе исследований разработать уточненную, по сравнению с квазистационарной, зависимость для напряжения трения на стенке трубы во время разгонного течения. Данная зависимость будет использоваться для замыкания построенной модели при расчете процессов, возникающих при пуске нефтепровода.

3) Провести экспериментальные исследования ускоренного и замедленного течения в трубопроводе. Выполнить верификацию существующих зависимостей для напряжения трения на стенке трубы при ускоренном и замедленном течениях. На основе анализа выбрать оптимальную зависимость, которая будет использоваться для замыкания построенной модели при расчете нестационарных процессов, возникающих при повышении/понижении производительности нефтепровода, остановке перекачки.

4) Разработать принципы построения программного комплекса поддержки принятия решения для диспетчерского персонала, основанного на сравнении в режиме реального времени фактических измерений параметров перекачки с расчетами, полученными согласно построенной физико-математической модели.

5) Разработать методики настройки, адаптации, оценки погрешности расчета, построенной модели, при использовании ее в составе программно-технических средств автоматизации нефтепровода.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

1) Разработана замкнутая физико-математическая модель расчета нестационарного течения жидкости в разветвленной трубопроводной системе, содержащей основные технологические элементы, встречающиеся на магистральных нефтепроводах.

2) Показано, что использование квазистационарных зависимостей допустимо для расчета изменения производительности, остановки нефтепровода, использование квазистационарных зависимостей для расчета процесса пуска нефтепровода может приводить к существенным погрешностям расчета.

3) Впервые проведены исследования поведения гидравлического сопротивления в процессе пуска участка нефтепровода из состояния покоя. На основе исследований разработана уточненная, по сравнению с квазистационарной, зависимость для напряжения трения на стенке трубы во время разгонного течения и соответствующее замыкание построенной модели для расчета процессов, возникающих при пуске нефтепровода.

4) Выполнена верификация существующих зависимостей для напряжения трения на стенке трубы при ускоренном и замедленном течениях жидкости на

экспериментальных данных по понижению/повышению производительности нефтепровода, остановке перекачки. На основе анализа выбрана оптимальная зависимость для замыкания построенной модели при расчете нестационарных процессов, возникающих при повышении и понижении производительности, остановке нефтепровода.

5) Предложена структура и функциональное наполнение программного комплекса поддержки принятия решения для диспетчерского персонала, основанного на сравнении в режиме реального времени фактических измерений параметров перекачки с расчетом, полученным согласно построенной физико-математической модели.

6) Разработаны уточненные методики настройки, адаптации, методика оценки погрешности расчета гидравлической математической модели реального нефтепровода.

**Практическая ценность** работы состоит в усовершенствовании существующих методик расчета нестационарных процессов, в применении к задаче расчета переходных процессов, возникающих в нефтепроводе при типовых технологических переключениях. Предложенные уточнения к общепринятой гипотезе квазистационарности, дают более точные результаты расчета переходных процессов в нефтепроводе. Разработаны практические методики настройки, адаптации, оценки погрешности расчета математических моделей реального нефтепровода. Результаты, полученные в диссертационной работе, были использованы при создании ПК «Система поддержки принятия решения DiSpry» производства ООО «Энергоавтоматика» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011616233). Данный программный комплекс внедрен для диспетчерского пункта управления нефтепроводом «Трубопроводная система Восточная Сибирь – Тихий Океан».

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1) Физико-математическая модель расчета нестационарного течения жидкости в разветвленной трубопроводной системе, содержащей основные технологические элементы, встречающиеся на магистральных нефтепроводах.

2) Результаты экспериментальной проверки корректности использования квазистационарных зависимостей для расчета типовых переходных процессов в нефтепроводах: пуск нефтепровода на режим, изменение производительности, остановка перекачки.

3) Результаты экспериментальных и теоретических исследований поведения гидравлического сопротивления в процессе пуска участка нефтепровода из состояния покоя.

4) Замыкание для построенной модели, учитывающее поведение касательного напряжения трения в процессе пуска нефтепровода.

5) Результаты верификации существующих зависимостей для напряжения трения на стенке трубы при ускоренном и замедленном течениях жидкости на экспериментальных данных по понижению/ повышению производительности нефтепровода, остановке перекачки.

6) Структура и функциональное наполнение программного комплекса поддержки принятия решения для диспетчерского персонала, основанного на сравнении в режиме реального времени фактических измерений параметров перекачки с расчетом гидродинамической модели.

7) Методики настройки, адаптации, оценки погрешности расчета, гидравлической математической модели реального нефтепровода.

**Достоверность** полученных в диссертации результатов обеспечивается сопоставлением результатов расчетов с фактическими данными с реальных нефтепроводов. Используемые численные методы являются хорошо обоснованными математически и апробированными на широком классе задач.

**Апробация работы.** Основные материалы диссертации докладывались на следующих научных конференциях:

- 3-я научно-техническая конференция на тему: «Обеспечение промышленной и экологической безопасности трубопроводного транспорта углеводородов». Оренбург, 2008г;
- 51-я научная конференция МФТИ, Россия, г. Москва, 2008г;
- Международная научно-техническая конференция Pipeline Simulation Interest Group (40th Annual Meeting), Galveston, Texas, USA, 2009;
- 53-я научная конференция МФТИ, Россия, г. Москва, 2010г;
- 54-я научная конференция МФТИ, Россия, г. Москва, 2011г;
- VII-я Международная научно-техническая конференция «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта», г.Новополоцк, 2011г.

**Публикации.** По результатам научных исследований опубликовано 7 работ, в т. ч. 2 из них в периодических изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК[6,7]. Получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ[8].

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 94 наименований. Работа изложена на 174 страницах, содержит 76 рисунков, 5 таблиц.

## Основное содержание работы

**Введение** содержит обоснование актуальности и практической значимости темы диссертации, формулировку цели работы, изложение научной новизны, структуры и содержания работы, апробацию результатов, перечисление публикаций автора по теме.

**Глава 1** содержит обзор и анализ литературы по теме диссертации.

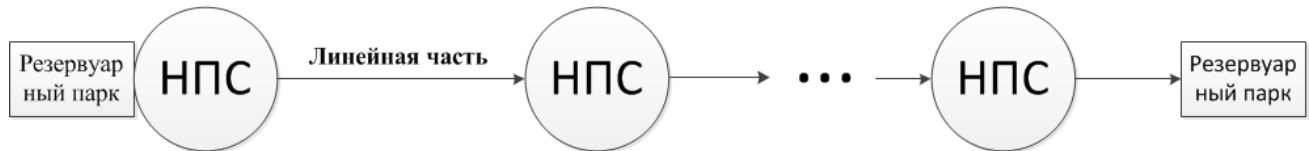
В **разделе 1.1** рассмотрены теоретические работы и экспериментальные исследования по переходным процессам в трубопроводах. Рассмотрены основные подходы к моделированию нестационарных процессов в трубопроводах. Выявлено, что в подавляющем большинстве работ для замыкания расчетной системы уравнений нестационарного течения жидкости в трубопроводе авторы используют гипотезу квазистационарности, без предварительной оценки влияния нестационарности на характеристики переходного процесса. Проведена классификация переходных процессов, возникающих при типовых технологических переключениях на МН.

В **разделе 1.2** рассмотрены работы, посвященные разгонному течению жидкости в трубопроводе, начатому из состояния покоя. Выявлено, что имеющаяся экспериментальная база по исследованию разгонного течения жидкости из состояния покоя в основном накоплена на лабораторных трубах небольшой протяженностью и практически все опыты проводились либо для условия появления постоянного градиента давления, либо для условия равноускоренного течения жидкости. Многие эксперименты демонстрируют существенное отличие экспериментальных данных от расчетов согласно гипотезе квазистационарности. В то же время, аналогичные явления в процессе пуска протяженного нефтепровода из остановленного состояния остаются не исследованы. Так же отсутствуют замкнутые модели для расчета пуска нефтепровода, учитывающие поведение гидравлического сопротивления во время разгонного течения

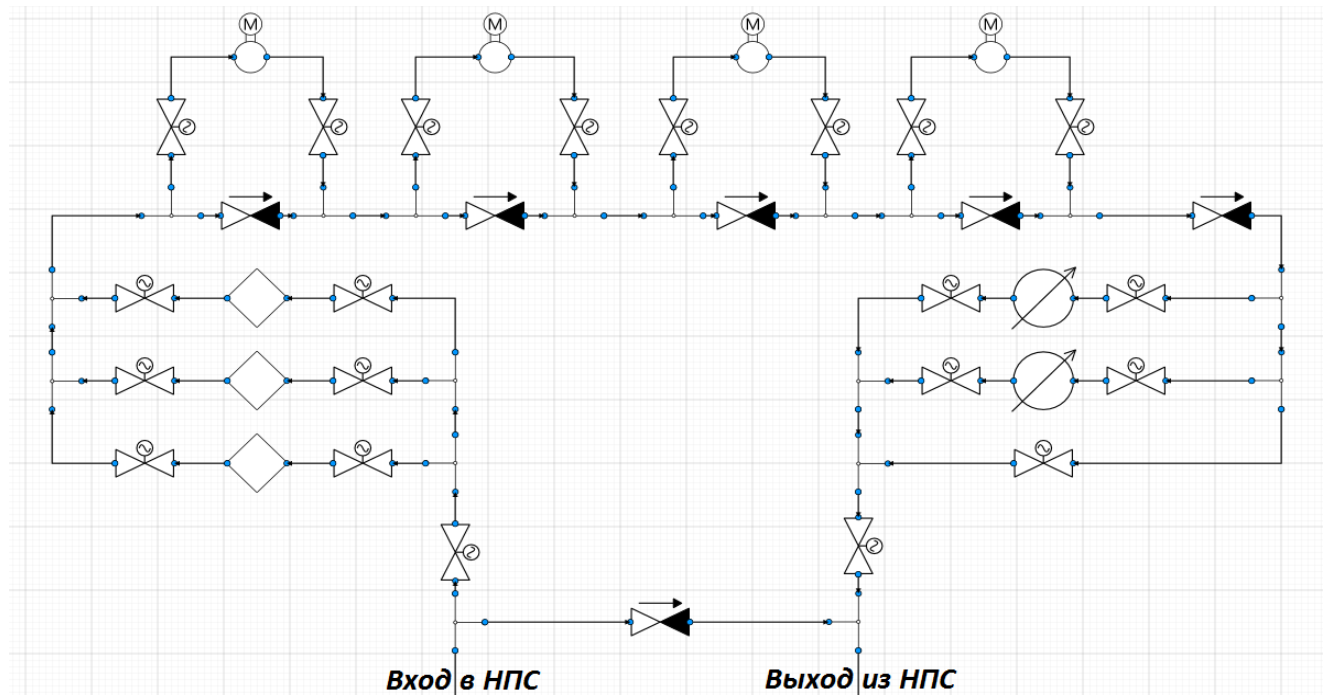
В **разделе 1.3** рассмотрены работы, посвященные ускоренному и замедленному течению жидкости в трубопроводе. Выявлено, что при наличии нескольких основных теоретических и эмпирических зависимостей для напряжения трения на стенке трубы при ускоренном и замедленном течениях жидкости, отсутствуют рекомендации по выбору оптимальной зависимости для описания нестационарных процессов, возникающих при повышении, понижении производительности, остановке МН.

**Глава 2** посвящена описанию физико-математической модели расчета нестационарных течений жидкости в разветвленном топологическом графе. Ребрами графа являются участки трубопровода, вершинами графа – технологическое оборудование, установленное на нефтепроводах. Характерный пример топологии МН представлен ниже.

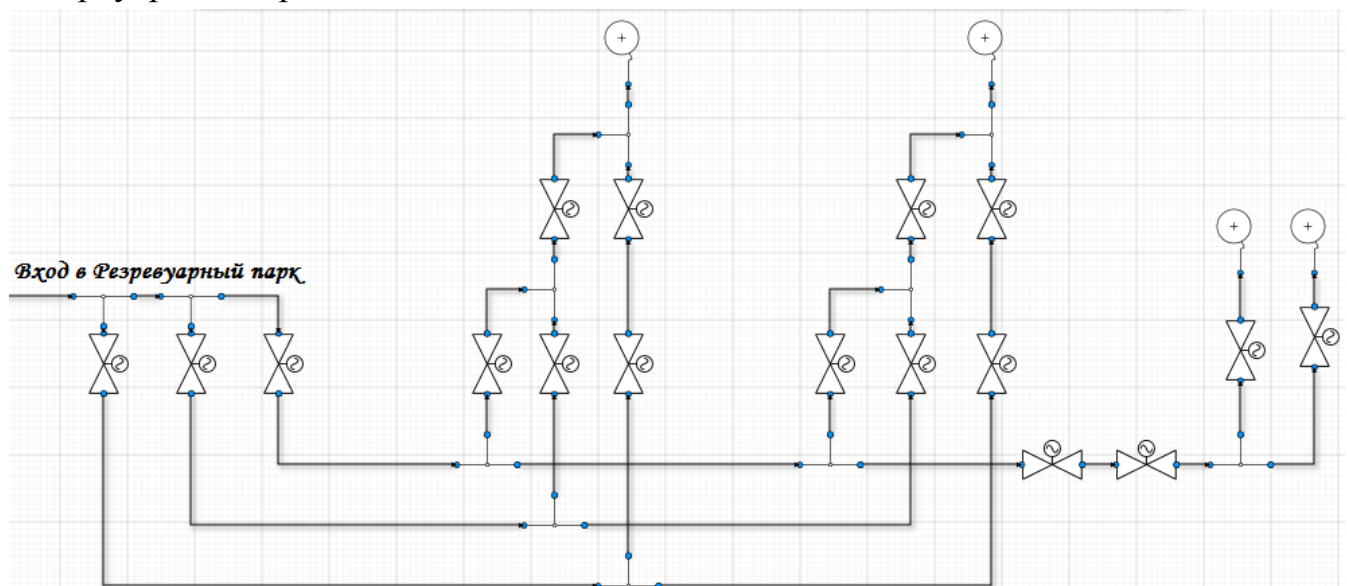
Структурная схема магистрального нефтепровода:



Насосно-перекачивающая станция (НПС):

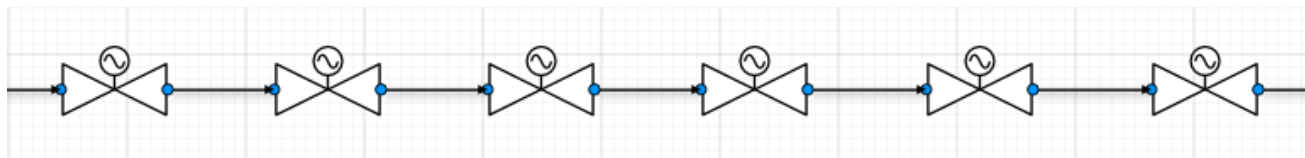


Резервуарный парк:

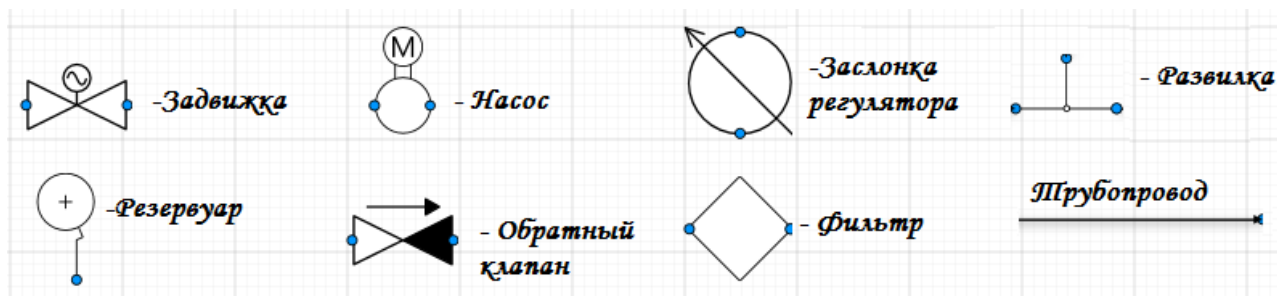




Линейная часть:



Обозначения:



Общая протяженность МН может достигать 1000-1400 км. Магистральный нефтепровод содержит от 1-2 до 7-10 НПС, длина линейных частей достигает 300-400км и содержит до 20-30 задвижек.

В разделе 2.1 представлен вывод уравнений модели. Основные допущения и положения модели:

- течение в трубопроводе одномерное. Характеристики  $p$ ,  $U$  в сечении трубопровода есть осредненные по сечению величины давления и скорости соответственно;

- уравнение состояния капельной жидкости  $\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{p-p_0}{K_{ж}}\right)$ , где  $\rho_0$ ,  $\rho$  - плотность при давлении  $p_0$ ,  $p$  соответственно,  $K_{ж}$ - модуль объемного сжатия жидкости;

- площадь сечения трубы с упругими стенками зависит от давления согласно закону Гука:  $S = S_0 \left(1 + b \frac{p-p_0}{E}\right)$ , где  $S_0$ ,  $S$  – площадь сечения трубы при давлении  $p_0$ ,  $p$  соответственно,  $E$ - модуль Юнга материала трубы,  $b$  - безразмерный коэффициент;

- для тонкостенных круглых труб для  $b$  справедлива зависимость:  $b = \frac{D}{\delta_0}$ , где  $\delta_0$  – толщина стенки трубы,  $D$ - внутренний диаметр;

- площадь сечения  $S_0$  трубы каждого ребра графа постоянна;

- для характерных величин изменения давления нефти в стальном нефтепроводе справедливо:  $b|p - p_0| \ll E$ ,  $|p - p_0| \ll K_{ж}$ ;

- для характерных величин скорости потока  $U (\approx 1 \text{ м/с})$  и величины скорости распространения возмущения в нефти в трубопроводе  $c (\approx 1000 \text{ м/с})$  справедливо:  $U \ll c$ .

Для представленных допущений и положений из уравнений неразрывности и движения получена следующая физико-математическая модель (уравнения на ребрах топологического графа):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{4\tau}{D} - \rho g \sin \alpha \quad (2)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{K_{ж}} + \frac{\rho}{E} \left( \frac{D}{\delta_0} \right)}} \quad (3)$$

где:  $t$  – время;  $x$  – координата по длине трубопровода;  $\tau$  – касательное напряжение трения на стенке трубопровода;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha$  – угол наклона трубопровода к горизонту;  $\rho$  – плотность перекачиваемой нефти (здесь и далее для плотности опущен индекс «0»).

**Раздел 2.2** содержит описание численного метода решения полученной системы уравнений (1)-(3) – метода характеристик. Гиперболическая система дифференциальных уравнений (1)-(2) имеет два семейства характеристик:

$$\frac{dx}{dt} = c, \quad \frac{dx}{dt} = -c.$$

Таким образом, для введенной расчетной сетки в пространстве «координата-время», с шагами  $\Delta x$ ,  $\Delta t$ , для которых

выполняется условие Куранта  $\frac{c\Delta t}{\Delta x} \leq 1$ , (рис. 1), исходная система дифференциальных уравнений (1)-(2) эквивалентна характеристической системе разностных уравнений, справедливых вдоль характеристик:

$$\frac{dx}{dt} = c: (p_B - p_A) + \rho c(U_B - U_A) + c \left( \frac{4\tau_A}{D} + \rho g \sin \alpha \Big|_{AB} \right) \Delta t = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dx}{dt} = -c: (p_B - p_D) - \rho c(U_B - U_D) - c \left( \frac{4\tau_D}{D} + \rho g \sin \alpha \Big|_{BD} \right) \Delta t = 0 \quad (5)$$

При известных значениях параметров в расчетных узлах на текущем временном слое могут быть вычислены соответствующие параметры во всех внутренних расчетных узлах для следующего временного слоя.

Для случая, когда точка **В** является левым граничным узлом расчетной сетки, уравнение (5) решается совместно с граничным соотношением на левой границе расчетной области  $F_L(p_B, U_B) = 0$ . Для случая, когда точка **В** является правым

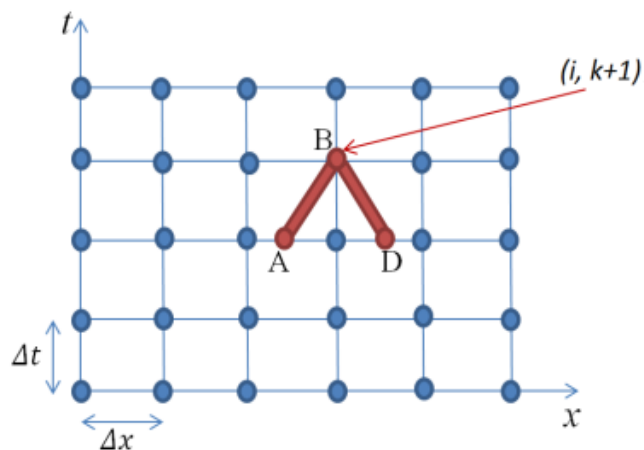


Рис. 1. Расчетная сетка

граничным узлом расчетной сетки, уравнение (4) решается совместно с граничным соотношением на правой границе расчетной области  $F_{пр}(p_B, U_B) = 0$ .

В разделе 2.3 приведены методы расчета течения жидкости для случая сопряжения трубопровода с основными технологическими элементами, установленными на МН. Для расчета параметров в граничных узлах расчетных областей, соединяющихся на сосредоточенном элементе, имеем характеристическое соотношение (4) для расчетной области слева от сосредоточенного

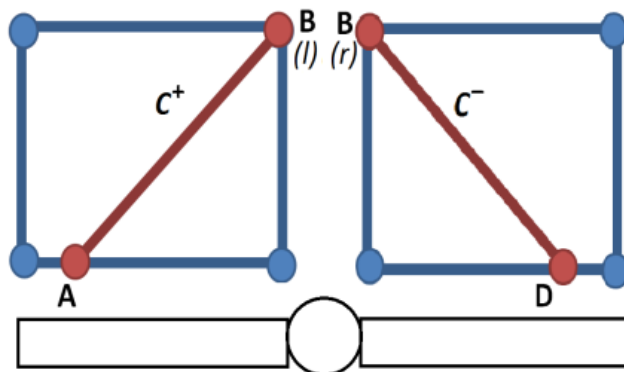


Рис. 2. Расчет сопряжения с технологическим оборудованием

элемента и характеристическое соотношение (5) для расчетной области справа от сосредоточенного элемента. Для того чтобы расчетная система имела решение необходимо задать условия сопряжения значений  $p^{(l)}, U^{(l)}$  и  $p^{(r)}, U^{(r)}$  на сосредоточенном элементе, которые определяются физической сутью моделируемого элемента:  $\vec{F}_{эл}(p^{(l)}, U^{(l)}, p^{(r)}, U^{(r)}) = 0$ , где  $\vec{F}_{эл}$  – заданная вектор-функция, определяющая условия сопряжения на сосредоточенном элементе. Таким образом, для расчета параметров для следующего временного слоя в узлах расчетной сетки, граничащих с сосредоточенными элементами модели, имеем систему уравнений (условия сопряжения в вершинах топологического графа):

$$(p_B^{(l)} - p_A) + \rho c_l (U_B^{(l)} - U_A) + c_l \left( \frac{4\tau_A}{D_l} + \rho g \sin \alpha |_{AB} \right) \Delta t = 0 \quad (6)$$

$$(p_B^{(r)} - p_D) - \rho c_r (U_B^{(r)} - U_D) - c_r \left( \frac{4\tau_D}{D_r} + \rho g \sin \alpha |_{BD} \right) \Delta t = 0 \quad (7)$$

$$\vec{F}_{эл}(p^{(l)}, U^{(l)}, p^{(r)}, U^{(r)}) = 0 \quad (8)$$

Для технологической задвижки условия сопряжения (8) имеют вид:

$$\rho U_B^{(l)} S_l = K_v(\alpha) \cdot K_{v0} \cdot K_{пер} \sqrt{2\rho |p_B^{(l)} - p_B^{(r)}| \text{sign}(p_B^{(l)} - p_B^{(r)})}$$

$$U_B^{(l)} \cdot S_l = U_B^{(r)} \cdot S_r$$

где:  $K_v(\alpha)$  – зависимость приведенной пропускной способности от степени открытия заслонки  $\alpha$ ,  $0 \leq K_v(\alpha) \leq 1$ ;  $K_{v0}$  – значение пропускной способности при полном открытии;  $K_{пер} = 1.96419 \cdot 10^{-5}$  – коэффициент перевода;  $S_l, S_r$  – площадь сечения трубопровода слева и справа от задвижки соответственно.

Для насоса условия сопряжения (8) имеют вид:

$$\frac{p_B^{(r)} - p_B^{(l)}}{\rho N^2} = a_0 + a_1 \left( \frac{S_l U_B^{(l)}}{N} \right) + a_2 \left( \frac{S_l U_B^{(l)}}{N} \right)^2 + a_3 \left( \frac{S_l U_B^{(l)}}{N} \right)^3$$

$$U_B^{(l)} \cdot S_l = U_B^{(r)} \cdot S_r$$

где:  $N$ - частота вращения насоса;  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты напорно-расходной характеристики насоса.

В разделе 2.3 выведены условия сопряжения (8) для технологических элементов: задвижка, насос, регулятор, обратный клапан, сбросной клапан, система сглаживания волн давления, развилка, резервуар.

Тестирование полученной физико-математической модели проводилось путем: 1) сравнения результатов расчета выхода на стационарные решения с результатами расчета системы стационарных нелинейных уравнений течения жидкости; 2) анализа сходимости численного решения при дроблении шага счета; 3) сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными по переходным процессам.

Тестирование по п. 1 показало совпадение результатов расчета выхода на стационарные решения с результатами расчета стационарных уравнений. Тестирование по п. 2 показало сходимость численного решения при дроблении шага счета. Результаты сравнения расчета с экспериментальными данными представлены в главах 3, 4.

Для замыкания полученной физико-математической модели (1)-(3) необходимо задать зависимость для величины касательного напряжения трения на стенке трубопровода  $\tau$  в уравнении (2). Согласно классической теории квазистационарности, зависимости для  $\tau$  гладких трубопроводов для произвольных нестационарных процессов имеют вид:

$$\begin{aligned} Re \leq 2300 \text{ (ламинарное течение):} & \quad \tau = \tau_{\text{лам}} = \frac{8\rho\nu}{D} U \\ Re \geq 10000 \text{ (турбулентное течение):} & \quad \tau = \tau_{\text{турб}} = \frac{\rho U^2}{8} \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \\ 2300 < Re < 10000 \text{ (переходная область):} & \quad \tau = \alpha \tau_{\text{турб}} + (1 - \alpha) \tau_{\text{лам}} \end{aligned}$$

$$Re = UD/\nu, \nu - \text{кинематическая вязкость; } \alpha = (Re - 2300)/7700.$$

В главах 3, 4 рассмотрен вопрос о корректности применения классических квазистационарных зависимостей для замыкания модели (1)-(3) при расчете нестационарных процессов, возникающих в нефтепроводах, и разработаны уточнения для расчета  $\tau$ .

В главе 3 представлены теоретические и экспериментальные исследования процесса разгонного течения нефти в МН, начинающегося из состояния покоя и предложены уточненные зависимости для  $\tau$  для замыкания построенной физико-математической модели (1)-(3) при расчете пуска нефтепровода.

В разделе 3.1 приведены результаты теоретического исследования нестационарных процессов, возникающих при пуске участка нефтепровода из остановленного состояния. Для затухания возмущения скорости (и соответствующего возмущения давления) при прохождении этого возмущения по трубопроводу справедлива следующая зависимость:

$$\frac{x}{4cD} = - \int_{U_1}^U \frac{d\bar{U}}{\lambda^0 |U^0| U^0 - \lambda |\bar{U}| \bar{U}} \quad (9)$$

где:  $x$  - пройденное возмущением расстояние вдоль трубопровода;  $U_1$  - возмущение скорости в начальном сечении  $x=0$ ;  $U^0$ ,  $U$  - скорость в сечении  $x$  до и после прихода возмущения соответственно;  $\lambda^0$ ,  $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления до и после прихода возмущения соответственно; связь между  $\tau$  и  $\lambda$  рассматривается как  $\tau = \rho U^2 \lambda / 8$ .

На основе решения уравнения (9) для различных зависимостей для трения, была получена связь между возмущением скорости в начальном сечении трубопровода  $U_1$  и коэффициентом затухания  $k$  этого возмущения (и соответствующего возмущения давления) при прохождении его по трубопроводу. Для закона трения для ламинарной области течения в квазистационарной постановке,  $\tau = \frac{8\rho\nu}{D} U$ :

$$k = \frac{16\nu}{cD} = const \quad (10)$$

Для закона трения для ламинарной области течения, учитывающего влияние нестационарности,  $\tau = \frac{8\rho\nu}{D} U + \frac{4\rho\nu}{D} \int_0^t \frac{\partial U(t_1)}{\partial t_1} W(t - t_1) dt_1$ , где  $W(t) = \sum_{k=1}^{\infty} e^{-(az_n^2/4)t}$ ,  $z_n$  - корни функции Бесселя 2го порядка,  $a = \frac{16\nu}{D^2}$ :

$$k \sim \frac{1}{U_1^{0.15}} \quad (11)$$

Для закона трения для турбулентной области течения в квазистационарной постановке,  $\tau = \frac{\rho U^2}{8} \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$ :

$$k \sim U_1^{0.75} \quad (12)$$

В разделе 3.2 приведены результаты экспериментальных исследований затухания возмущения при пуске участка нефтепровода из остановленного

состояния. Выявлено, что в начальные моменты течения затухание возмущений от пуска насосной станции при прохождении по трубопроводу происходит существенно слабее, чем согласно расчету по гипотезе квазистационарности.

На рис. 3, 4 приведены данные по одному из проведенных экспериментов по пуску нефтепровода из остановленного состояния и результаты обработки:



Рис. 3. Возмущение скорости в начальном сечении, созданное последовательным пуском двух насосных агрегатов (НА)

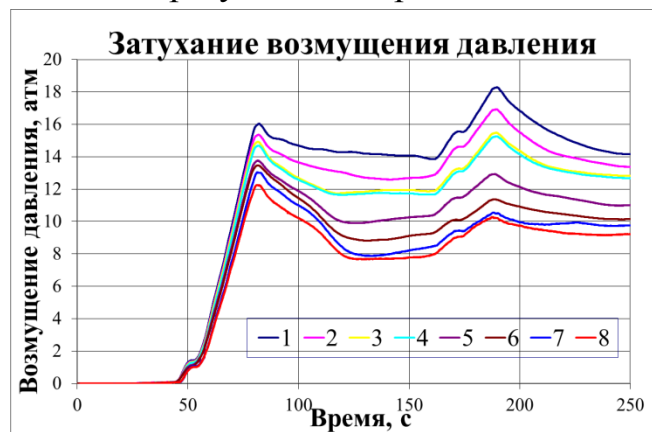


Рис. 4. Возмущение давления, зарегистрированное: 1—в начальном сечении трубопровода; 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 — на расстоянии 20, 43, 46, 92, 128, 156, 182км от начала трубопровода соответственно

Затухание возмущения от пуска первого НА происходит существенно слабее, чем затухание возмущения от пуска второго НА. В то же время величина средней скорости течения в трубопроводе при прохождении первого и второго возмущения соответствует зоне турбулентного течения, и величина возмущения  $U_1$  для пуска первого НА превышает соответствующую величину для пуска второго НА. Полученный результат противоречит оценке (12), полученной на основе гипотезы квазистационарности. Анализ затухания возмущений, созданных в различные моменты стартового течения, представлен на рис. 5:

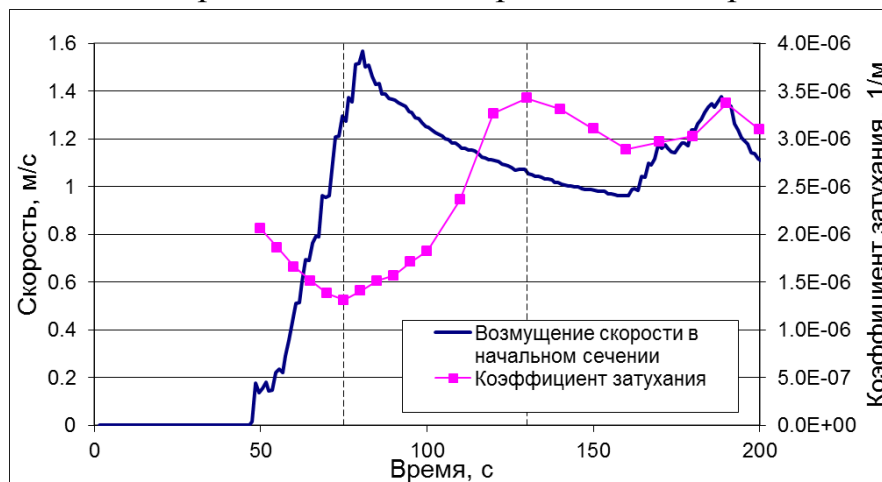


Рис. 5. Затухание возмущений

На основе анализа полученных экспериментальных зависимостей  $k(U_1)$  для экспериментальных пусков и сопоставления их с полученными теоретическими зависимостями (10), (11), (12) выделены основные этапы пускового течения нефтепровода из состояния покоя:

1) Период ламинарного течения, которое затягивается до чисел Рейнольдса существенно превышающих общепринятое критическое значение  $Re = 10000$ . При этом для описания поведения коэффициента гидравлического сопротивления для такого течения можно выбрать зависимость (11).

2) Начало турбулизации течения в сечениях, при котором происходит увеличение значения гидравлических потерь.

3) Период релаксации, в течение которого значение гидравлического трения в сечении достигает квазистационарного значения.

4) Дальнейший период времени, для которого значение гидравлического сопротивления описывается теорией квазистационарного турбулентного трения.

Для различных экспериментов время от начала течения в сечении трубопровода до начала соответствия гидравлического сопротивления квазистационарному значению составляло 60 – 170 с. Использование для расчета классических квазистационарных зависимостей приводит к ошибке расчета значения пикового давления гидроударной волны, приходящей на следующую по потоку НПС от пуска предыдущей, для рассмотренных экспериментов составило до 3-4 атм. (рис. 6-8).

В разделе 3.3 представлена зависимость для  $\tau$ , полученная в результате обработки экспериментальных пусков 3х МН различного диаметра, транспортирующих нефть различных реологических свойств (всего проведен 21 экспериментальный пуск). Полученная зависимость для касательного напряжения в сечении трубопровода во время пуска нефтепровода из состояния покоя:

$T_0$  – время начала течения через сечение трубопровода;

$$T_1 \text{ определяется как: } \int_{T_0}^{T_1} \left( A_1 \left| \frac{1}{U} \frac{dU}{dt} \right| Re^{b_1} + \frac{|U|}{D} Re^{b_2} \right) dt = \bar{I}_1;$$

$$T_2 \text{ определяется как: } \int_{T_1}^{T_2} \frac{|U|}{D} Re^{b_3} dt = \bar{I}_2;$$

$$t \leq T_1: \quad \tau = \tau_{\text{лам}} = \frac{8\rho\nu}{D} U + \frac{2\rho\nu}{R} \int_0^t \frac{\partial U(t_1)}{\partial t_1} W(t - t_1) dt_1 \quad (\text{лам. течение}) \quad (13)$$

$$T_1 \leq t \leq T_2: \quad \tau = \alpha \cdot \tau_{\text{лам}} + (1 - \alpha) \cdot \tau_{\text{турб}} \quad (\text{переходная область}) \quad (14)$$

$$t \geq T_2: \quad \tau = \tau_{\text{турб}} = \frac{\rho U^2}{8} \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (\text{турбулентное течение}) \quad (15)$$

$$\alpha(t) = \frac{\bar{I}_2 - \int_{T_1}^t \frac{|U|}{D} Re^{b_3} dt}{\bar{I}_2};$$

значение эмпирических коэффициентов:  $A_1 = 7.4428 \cdot 10^{-5}$ ,  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -0.206$ ,  $\bar{I}_1 = 11.711$ ,  $b_3 = -0.015$ ,  $\bar{I}_2 = 33.778$ .

Результаты расчета давления в точке линейной части трубопровода при пуске НПС в начале линейной части представлены на рис. 6-8:

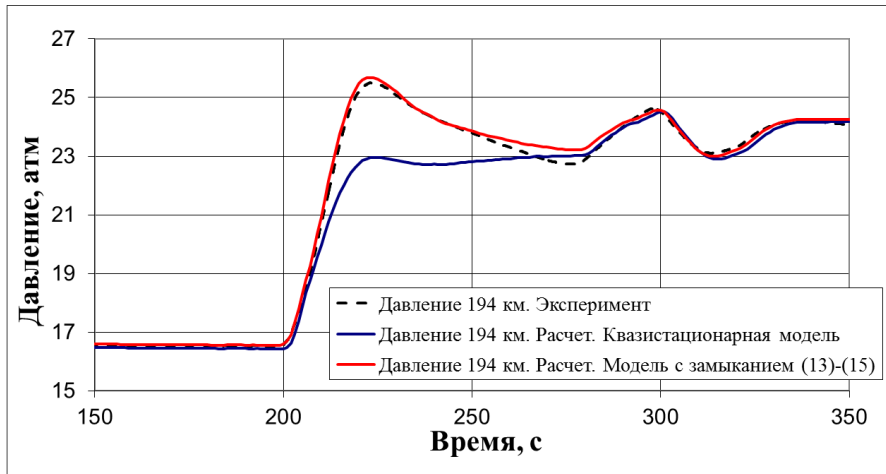


Рис. 6. Эксперимент #7 (нефтепровод 1)

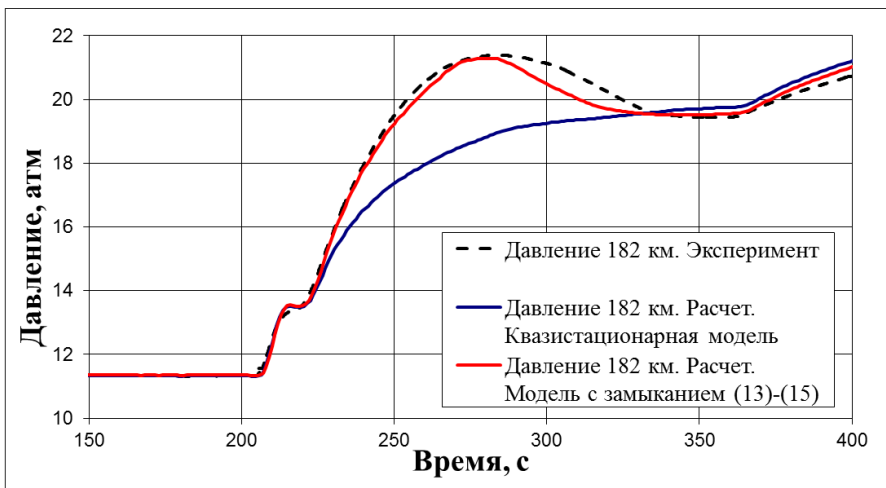


Рис. 7. Эксперимент #3 (нефтепровод 2)

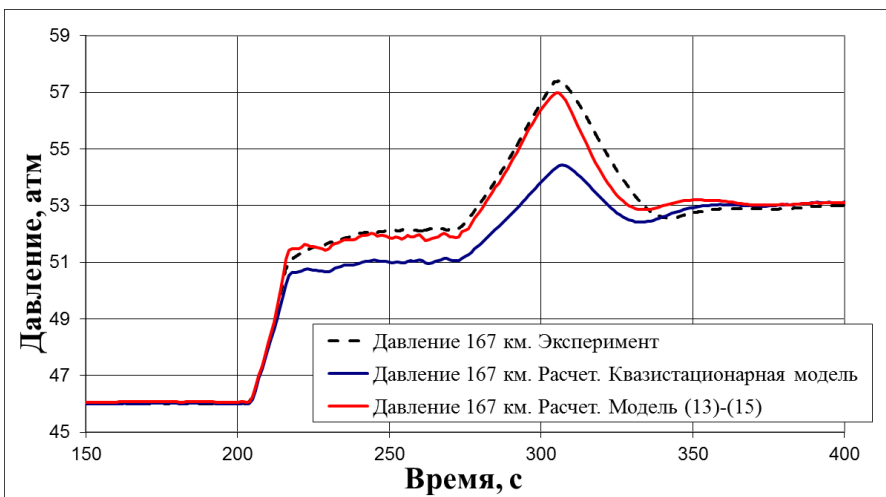


Рис. 8. Эксперимент #2 (нефтепровод 3)



Использование зависимостей (13)-(15) для замыкания модели (1)-(3) для расчета нестационарных процессов, возникающих при пуске нефтепровода из состояния покоя, значительно увеличивают точность расчета по сравнению с использованием квазистационарных зависимостей.

**Глава 4** содержит результаты верификация существующих зависимостей для напряжения трения на стенке трубы  $\tau$  при ускоренном и замедленном течениях жидкости. На основе анализа выбрана оптимальная зависимость для замыкания модели (1)-(3) при расчете нестационарных процессов, возникающих при повышении и понижении производительности нефтепровода, остановке перекачки.

В разделе 4.1 приведены результаты теоретического исследования ускоренного и замедленного течения нефти, возникающего при изменении производительности перекачки, остановке нефтепровода. Получены теоретические оценки значений критериев нестационарности процесса  $K_n = \frac{D}{U^2} \frac{dU}{dt}$ ,  $\overline{K_n} = \frac{|K_n|}{Re}$  для гидродинамических процессов, возникающих в МН во время технологических операций по изменению производительности, остановке перекачки. Оценки приведены для нефтепроводов диаметром  $D=500\text{мм}$ ,  $D=700\text{мм}$ ,  $D=1000\text{мм}$ ,  $D=1200\text{мм}$ .

В разделе 4.2 рассмотрены экспериментальные данные по нестационарным процессам с различными значениями критериев нестационарности  $K_n$ ,  $\overline{K_n}$ , зарегистрированные во время технологических операций на МН, и проведено сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов по построенной модели с замыканием различными зависимостями для касательного напряжения трения. Помимо классической квазистационарной зависимости рассмотрены следующие зависимости для трения:

$$\text{Зависимость Brunone: } \tau = \tau_{\text{кв}} + \frac{k\rho D}{4} \left( \frac{\partial U}{\partial t} + c \cdot \text{sign}(U) \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right),$$

$$k = \frac{\sqrt{C^*}}{2}, C^* = \frac{7.14}{Re \log(14.3/Re^{0.05})}. \quad (16)$$

$$\text{Зависимость Vardy \& Brown: } \tau = \tau_{\text{кв}} + \frac{2\rho\nu}{R} \int_0^t \frac{\partial U(t_1)}{\partial t_1} W(t - t_1) dt_1, \quad (17)$$

где весовая функция определяется как:

$$W(t) = \frac{\alpha}{\sqrt{\pi t}} \cdot e^{(-\beta t)}; \alpha = \frac{D}{4\sqrt{\nu}}; \beta = 0.54\nu Re^k / D^2; k = \log(14.3/Re^{0.05}).$$

$$\text{Зависимость Zarzycki: } \tau = \tau_{\text{кв}} + \frac{2\rho\nu}{R} \int_0^t \frac{\partial U(t_1)}{\partial t_1} W(t - t_1) dt_1, \quad (18)$$

где весовая функция определяется как:  $W(t) = (c_1 Re^{c_2} + c_3) \sum_{i=1}^8 A_i e^{-b_i \bar{\tau}}$ .

Для всех зависимостей (16) - (18) касательное напряжение трения представлено как:  $\tau = \tau_{\text{КС}} + \tau_{\text{НС}}$ , где  $\tau_{\text{КС}}$  – квазистационарная составляющая трения;  $\tau_{\text{НС}}$  – добавка к трению, учитывающая влияние нестационарности во время переходного процесса.

На рис. 9 представлено сравнение результатов расчета остановки нефтепровода с экспериментом. Сравнение проводилось по давлению в середине линейной части нефтепровода.

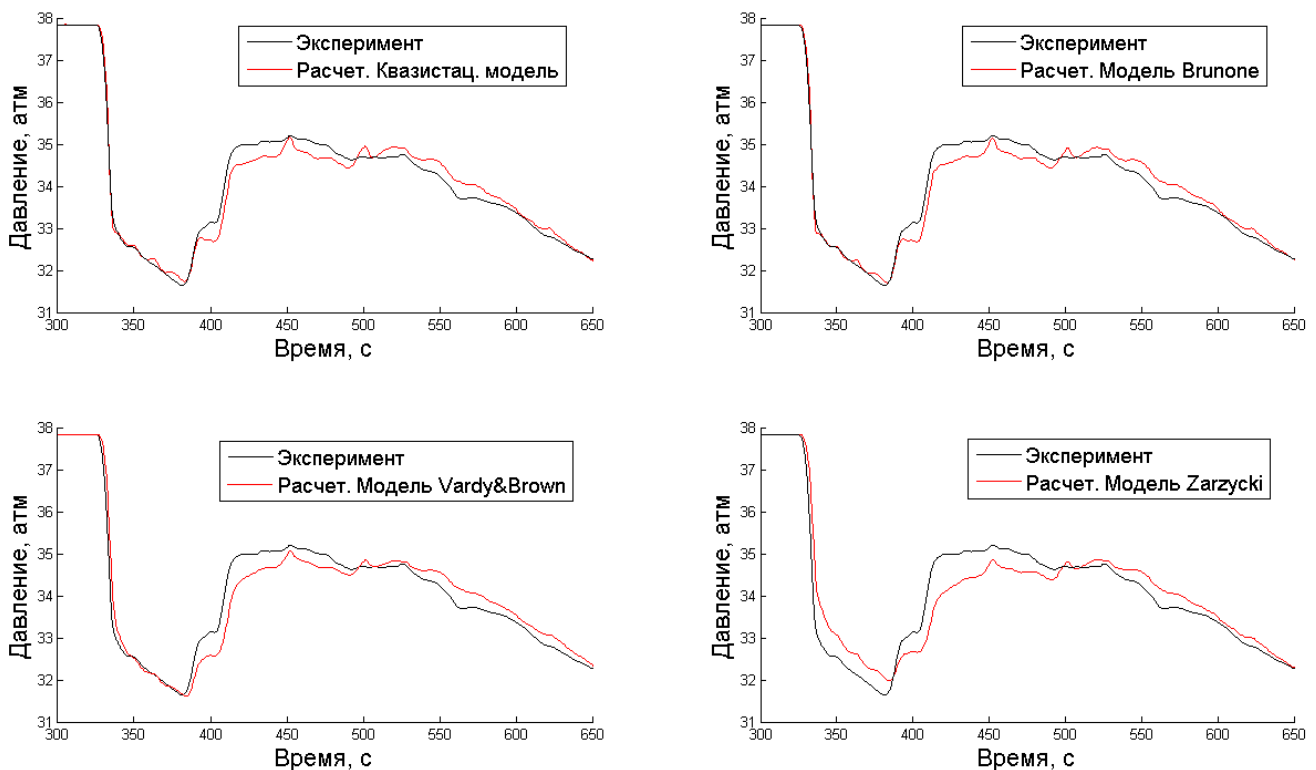


Рис. 9. Сравнение результатов расчета с различными зависимостями для  $\tau$

Для всех рассмотренных экспериментальных переходных процессов степень нестационарности  $K_H$  составила от 0.1 до 1.55, степень нестационарности  $\overline{K_H}$  составила от  $3 \cdot 10^{-7}$  до  $7.5 \cdot 10^{-5}$ . По результатам сравнения расчетных данных с экспериментом можно заключить, что значительного отличия экспериментальных данных от расчета по модели (1)-(3) с замыканием квазистационарными зависимостями для  $\tau$  зафиксировано не было. Расчеты по модели (1)-(3) с замыканием квазистационарной зависимостью для  $\tau$  и зависимостью Brunone (16) дают соответствие экспериментальным данным с достаточной степенью точности. В то же время использование зависимостей (17), (18) для расчета распространения

фронта волн понижения/повышения давления дают большее «размытие» фронта волны и затухания амплитуды волны, чем это зафиксировано в экспериментах.

В главе 5 рассмотрены основные принципы построения автоматизированной системы, производящей гидродинамическое моделирование течения в нефтепроводе в режиме реального времени и сравнение фактических и расчетных распределений давления вдоль нефтепровода.

**Раздел 5.1** содержит описание принципов построения системы. Формализованы основные задачи программного комплекса:

1) Моделирование стационарных и нестационарных течений. Характерная скорость изменения параметров  $p$ ,  $U$  в сечениях трубопровода –  $c$  – скорость распространения возмущений в нефтепроводе.

Выполняется с помощью построенной модели (1)-(3) с замыканием соответствующими зависимостями для  $\tau$ . В режиме реального времени в модель по системе телемеханики поступают данные измерений параметров, которые используются в модели в качестве граничных условий и текущих характеристик моделируемого оборудования: высота уровня нефти в резервуарах, частота вращения насосов, процент положения заслонок регуляторов, положение задвижек.

2) Моделирование процесса транспорта партий нефти с отличающимися реологическими свойствами для получения реального распределения реологических свойств нефти по длине трубопровода (в т.ч. для расчета  $\tau$  в уравнение (2)). Характерная скорость транспорта партий нефти по трубопроводу –  $U$  – скорость течения,  $U \ll c$ ;

Выполняется расчет транспорта партий по линейной части нефтепровода. Границы партий определяются по фактическим измерениям реологических свойств нефти, производимым на НПС.

3) Идентификация основных параметров технологического оборудования (напорно-расходные характеристики насосных агрегатов, эквивалентные диаметры трубопровода) для учета в модели изменений характеристик моделируемого оборудования в процессе эксплуатации нефтепровода. Характерная скорость изменения таких параметров  $\ll U$ .

Выполняется посредством накопления статистической информации по работе основного технологического оборудования и идентификация коэффициентов напорно-расходных характеристик насосов и эквивалентного диаметра трубопроводов.



Рис. 10. Структурная схема системы поддержки принятия решения

В разделе 5.2 рассмотрены вопросы задания в модель характеристик реального нефтепровода и моделируемого технологического оборудования, идентификации параметров модели.

Рассмотрен вопрос влияния неравномерности толщины стенки трубопровода на гидравлические параметры течения. На примере двух действующих нефтепроводов РФ показано, что расчет и задание в гидравлической модели эквивалентного диаметра трубопровода и скорости звука на участках линейной части между двумя задвижками вместо часто используемой методики расчета и задания единого эквивалентного диаметра и скорости звука от НПС до НПС приведет к увеличению точности расчета стационарных уровней давления и изменения давления во время нестационарных процессов порядка 5-7%.

Предложены уточнения к общепринятому способу идентификации эквивалентного диаметра нефтепровода. Разработанная методика идентификации эквивалентного диаметра может быть применена для модели трубопровода с неравномерным распределением толщины стенки.

Предложены уточнения к общепринятому методу идентификации напорно-расходной характеристики насоса. Предложенная методика позволяет сохранить форму кривой зависимости напора насоса от расхода за пределами рабочей

области при идентификации напорно-расходной характеристики насоса по статистическим данным работы насоса в рабочей области.

**Раздел 5.3** содержит описание методик оценки погрешности расчета гидродинамической математической модели, использующей для расчета реальные измерения телемеханики. Результат расчета давления моделью (1)-(3) рассмотрен как функция поступающих в модель измеряемых параметров, использующихся для расчета:

$$p = F(H_i, N_i, Z_i, D_i^{\text{ид}}, a_i^{\text{ид}}) \quad (19)$$

где:  $p$  – рассчитанное моделью давление в точке нефтепровода;  $H_i$  – измерения уровней нефти в резервуарах;  $N_i$  – измерения частот вращения насосов;  $Z_i$  – измерения положение заслонок и запорной арматуры;  $D_i^{\text{ид}}$  – идентифицированные эквивалентные диаметры;  $a_i^{\text{ид}}$  – идентифицированные коэффициенты напорно-расходных характеристик насосов.

Аргументы  $H_i, N_i, Z_i$  функции  $F$  в (19) – есть результат измерения различных датчиков. Для каждого датчика и канала передачи данных известна погрешность измерения и погрешность канала. Аргументы  $D_i^{\text{ид}}, a_i^{\text{ид}}$  – есть вычисленная величина по измерениям, т.е. является косвенным измерением, для которого тоже может быть посчитана погрешность косвенного измерения.

Таким образом, из (19) рассчитанное моделью давление является косвенным измерением, и оценку погрешности расчета модели можно определить как:

$$\sigma_p = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2}$$

где  $x_i$  –  $i$ -й аргумент функции  $F$  в зависимости (19).

В разделе 5.3 получены методики оценки погрешности идентификации напорно-расходных характеристик насосных агрегатов, эквивалентных диаметров трубопровода, и оценки погрешности расчета модели, использующей для расчета реальные измерения телемеханики.

## Основные результаты и выводы:

1) Разработана замкнутая физико-математическая модель расчета нестационарного течения жидкости в разветвленной трубопроводной системе, содержащей основные технологические элементы, встречающиеся на магистральных нефтепроводах.

2) Показано, что использование квазистационарных зависимостей для замыкания построенной модели допустимо для расчетов процессов повышения, понижения производительности и остановки нефтепровода. Использование квазистационарных зависимостей для замыкания построенной модели для расчета пуска нефтепровода может приводить к ошибке расчета пикового давления гидроударной волны, приходящей на следующую по потоку НПС от пуска предыдущей, до 3-4 атм.

3) Показано, что в начальные моменты пуска нефтепровода из состояния покоя, даже когда течение происходит при больших числах Рейнольдса, гидравлическое сопротивление существенно ниже своего квазистационарного значения. Ламинарность течения наблюдается при числах Рейнольдса существенно превышающих  $Re^* = 10^4$ , далее следует переходный режим из ламинарного течения в турбулентное, и только после этого наблюдается соответствие квазистационарному турбулентному течению.

4) Разработана уточненная, по сравнению с квазистационарной, зависимость для напряжения трения на стенке трубы во время разгонного течения для замыкания построенной модели при расчете пуска нефтепровода. Показано хорошее соответствие расчетов по полученной модели экспериментальным данным.

5) Выполнена верификация существующих зависимостей для напряжения трения на стенке трубы при ускоренном и замедленном течениях на экспериментальных данных по понижению и повышению производительности нефтепровода, остановке перекачки.

6) Разработана структура и функциональное наполнение ПК поддержки принятия решения для диспетчерского персонала, основанного на сравнении в режиме реального времени фактических измерений параметров перекачки с расчетом гидродинамической модели. Разработан и внедрен соответствующий программный комплекс.

7) Разработаны уточненные методики настройки, адаптации, методика оценки погрешности расчета гидравлической математической модели реального нефтепровода, использующей для расчета измерения параметров перекачки и текущих параметров технологического оборудования.

## Список работ по теме диссертации:

1) И.О. Золотов, В.Е. Исаев. Применение математического моделирования к задаче разработки и настройки алгоритмов управления нефтепроводом. //Труды 51-й научной конференции МФТИ. Часть III. Аэрофизика и космические исследования. Т.2. - Москва: МФТИ, 2008, с. 82-83.

2) В.А. Гурьев, И.О. Золотов, С.А. Камагаев, и др. Моделирование аварийных ситуаций на магистральных нефтепроводах. Расчет превышения несущей способности трубопроводов. //Обеспечение промышленной и экологической безопасности трубопроводного транспорта углеводородов: Материалы III-й научно-технической конференции. – Оренбург: ИПК «Газпромпечатъ», 2009, с. 19-27.

3) И.О. Золотов. Об особенностях стартовых течений в нефтепроводах. //Труды 53-й научной конференции МФТИ. Часть III. Аэрофизика и космические исследования. Т.2. - Москва: МФТИ, 2010, с. 145-146.

4) И.О. Золотов, А.С. Лосенков, С.А. Стрельникова, и др. Опыт разработки системы поддержки диспетчера на основе on-line гидродинамической математической модели. //Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта. Материалы VII Международной научно-технической конференции. – Новополюцк, 2011, с. 245-246.

5) И.О. Золотов. Гидродинамическое моделирование пуска нефтепровода из остановленного состояния. //Труды 54-й научной конференции МФТИ. Аэрофизика и космические исследования. - Москва: МФТИ, 2011, с. 142-143.

6) И.О. Золотов, А.С. Лосенков, С.А. Стрельникова. Особенности построения гидравлических моделей трубопровода с переменной толщиной стенки. //Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2011, №5, с.54-65. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Zolotov/Zolotov\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Zolotov/Zolotov_1.pdf)

7) И.О. Золотов, А.С. Лосенков, С.А. Стрельникова. Об одной особенности стартовых режимов работы нефтепроводов. //Нефтяное хозяйство, 2012, №3, с. 102-105.

8) И.О. Золотов, В.Е. Исаев, А.С. Лосенков, и др. Система поддержки принятия решения (СППР) с функцией обнаружения утечек (DiSPY) //Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011616233.