

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт нефти и газа

Кафедра «Топливообеспечение и горюче-смазочные материалы»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ТОГСМ

\_\_\_\_\_ Ю. Н. Безбородов

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
в форме бакалаврской работы**

Студенту Миронову Александру Геннадьевичу  
Группа НБ12-06, направление 23.03.03 Сервис транспортных и  
транспортно-технологических машин и оборудования  
(Нефтепродуктообеспечение и газоснабжение).

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка  
гидравлического симулятора переходных технологических режимов в  
магистральном нефтепроводе»,

утверждена приказом по Университету № 6138/с от «10» мая 2016 г.

Руководитель ВКР Е. Д. Агафонов, к. т. н., доцент кафедры ТОГСМ,  
Институт нефти и газа СФУ.

Исходные данные для ВКР: технологическая и ситуационная схемы МН  
«Омск – Анжеро-Судженск», акты опробования запуска останова и перехода  
между режимами МН «Омск – Анжеро-Судженск», результаты измерения  
давлений при осуществлении испытаний, описанных в актах. Справочная и  
нормативная информация по гидродинамическим расчетам и процедурам  
расчета технологических режимов АО «Транснефть – Западная Сибирь».

Перечень разделов ВКР:

– обзор подходов и инструментов построения гидравлических моделей  
МН;

– использование Matlab/SimHydraulics для построения моделей МН;

– построение модели МН «Омск - Анжеро-Судженск»;

– безопасность и экологичность;

– экономическая часть.

Перечень графического или иллюстративного материала с указанием  
основных чертежей, плакатов:

– гидравлическая схема линейного участка Чулымская НПС – НПС  
Сокур;

– профиль трасы МН «Омск – Анжеро-Судженск»;

– модификация инструментов пакета Matlab / SimHydraulics для  
моделирования переходных режимов;

– модель МН «Омск – Анжеро-Судженск», построенная в Matlab /  
SimHydraulics;

– алгоритм настройки модели МН «Омск - Анжеро-Судженск»;

– алгоритм прогнозирования технологических параметров МН;

– анализ полученных результатов;

– сравнение затрат на использование прогнозных симуляторов.

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_ Е.Д. Агафонов

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_ А.Г. Миронов

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Обзор подходов и инструментов построения гидравлических моделей магистральных нефтепроводов.....	6
1.1 История развития представлений о гидравлических процессах в трубопроводах .....	6
1.2 Математические модели течения жидкости в трубопроводе.....	9
1.3 Современные инструменты моделирования гидравлических систем, магистральных нефтепроводов.....	17
2 Использование <i>Matlab/SimHydraulics</i> для построения моделей магистральных нефтепроводов.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.1 Использование <i>Matlab/SimHydraulics</i> для построения стационарных режимов работы магистральных нефтепроводов.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.2 Возможности <i>Matlab/SimHydraulics</i> для моделирования нестационарных процессов.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3 Построение модели «Омск - Анжеро-Судженск».....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.1 Технология и алгоритмы настройки моделей неустановившихся процессов в нефтепроводе .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.3 Прогноз энергозатрат при переходных режимах.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.4 Учет теплообменных процессов в моделях магистральных нефтепроводов в пакете <i>Matlab/Simscape</i> .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4 Безопасность и экологичность.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.1 Анализ потенциальных опасных и вредных производственных факторов при проведении работ.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.2 Инженерные и организационные решения по обеспечению безопасности работ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.3 Санитарные требования к помещению и размещению используемого оборудования .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.4 Обеспечение безопасности технологического процесса.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.5 Обеспечение взрывопожарной и пожарной безопасности.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.6 Обеспечение безопасности в аварийных и чрезвычайных ситуациях.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
4.7 Экологичность проекта .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5 Экономическая часть .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.1 Расчет затрат на разработку гидравлического симулятора.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.2 Расчет экономической эффективности.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Заключение .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Список сокращений .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Список использованных источников .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Приложение А Листинг блока <i>my resistive tube</i> .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Приложение Б Листинг блока <i>my chamber</i> .....	70
Приложение В Листинг блока <i>my station</i> .....	72
Приложение Г Листинг аппроксимации ( <i>Q-H</i> ) характеристик насоса.....	75
Приложение Д Листинг оптимизирующей функции .....	76
Приложение Е Лист самоаттестации .....	77

## ВВЕДЕНИЕ

В транспортной системе России значительную часть занимает трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Магистральные нефтепроводы (далее МН), по которым происходит перекачка жидкости – сложные технологические объекты, состоящие из подземных, подводных, наземных и надземных трубопроводов и связанных с ними насосных станций, хранилищ нефти и других технологических объектов, обеспечивающих транспортировку, приемку, сдачу нефти потребителям или перевалку на другой вид транспорта.

При эксплуатации МН важнейшими критериями являются энергоэффективность и надежность. Улучшение этих показателей обеспечивается выбором оптимальных технологических режимов и контролем за их осуществлением. Для выполнения этих задач диспетчерские и технологические службы компании АО «Транснефть – Западная Сибирь» используют математические модели МН для прогноза гидравлических процессов и их параметров. При построении моделей технологических режимов перекачки нефти в АО «Транснефть – Западная Сибирь» используется методология, в рамках которой движение нефти и нефтепродуктов рассматривается как установившееся. Исходя из этого допущения, определяются расчетная пропускная способность, режимы работы насосов и другие параметры. Однако, в ходе эксплуатации оборудования как правило 1-2 раза в сутки происходит переход с одного режима на другой, что влечет за собой неустановившееся течение жидкости в течение нескольких часов. Кроме того, многие явления в трубопроводе могут быть описаны только в терминах динамических моделей: явление резонанса, распространение волн давления, гидроудар и т.д. Отсутствие прогнозных моделей, позволяющих выявлять эти эффекты, может привести к остановке и повреждению оборудования. Поэтому необходимо использовать инструменты, позволяющие строить модели неустановившихся режимов течения жидкости.

На сегодняшний день существуют варианты программного обеспечения, позволяющее строить такие модели. Однако они имеют ряд типичных недостатков:

- отсутствует гибкость настройки (необходимость учета в модели параметров отличных от табличных или общепринятых, информация о которых может быть получена только на основании анализа измеренных данных);
- невозможность работать в режиме реального времени;
- высокая стоимость.

Анализ выявленных проблем и потребностей компании АО «Транснефть – Западная Сибирь» обуславливает актуальность создания доступного и функционального инструмента для ведомственного пользования в производственных организациях ОАО «АК «Транснефть», позволяющего создавать модели магистральных трубопроводов.

Объектом исследования являются процессы, происходящие в магистральном трубопроводе.

Предметом исследований является создание моделей неустановившихся режимов течения жидкости в МН.

Цель бакалаврской работы – повышение эффективности работы диспетчерских и технологических служб нефтетранспортных компаний при планировании и мониторинге технологических процессов в МН.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать современные методы построения математических моделей, ознакомиться с классификацией гидравлических моделей МН;

- произвести анализ существующих программных продуктов, предназначенных для построения моделей неустановившихся процессов в МН;

- предложить модификацию стандартного пакета *Matlab/SimHydraulics*, создать на его базе модель технологического участка МН «Омск – Анжеро-Судженск».

Перечисленные задачи определяют следующую структуру пояснительной записки.

Во введении описывается актуальность, формулируется цель и задачи работы.

В первом разделе приводится обзор подходов и инструментов для построения гидравлических моделей магистрального нефтепровода. Сделан обзор научной и справочной литературы, посвященной синтезу моделей гидродинамики в трубопроводном транспорте нефти и нефтепродуктов.

Второй раздел посвящен анализу применения *Matlab/SimHydraulics* для построения моделей установившихся и неустановившихся процессов в МН. Модификации стандартных средств *Matlab/SimHydraulics* для моделирования неустановившихся процессов в МН. Оценке неизвестных параметров МН по известным данным.

В третьем разделе решается задача построения модели МН «Омск – Анжеро-Судженск», описывается процесс оптимизации модели в соответствии с выбранным критерием качества, проводится процедура верификации модели на основании измеренных данных, полученных при испытаниях переходных режимов указанного МН.

Четвертый раздел работы посвящен вопросам безопасности использования результатов работы на предприятии АО «Транснефть – Западная Сибирь» с учетом требований и инструкций, ГОСТов и нормативных документов.

В пятом разделе показана экономическая эффективность предлагаемого разрабатываемого продукта по сравнению с существующими аналогами.

В заключении делаются выводы, анализируется полнота решения поставленных в работе задач.

В работе используются достижения следующих наук и теорий: теоретическая и вычислительная гидродинамика, теория идентификации, теория оптимизации, информационные технологии, системный анализ.

Теоретическая значимость работы заключается в анализе и синтезе подходов к настройке и оптимизации гидродинамических моделей течения жидкостей в трубопроводах.

Практическая значимость исследования обусловлена необходимостью внедрения предложенных средств моделирования переходных процессов в компании АО «Транснефть – Западная Сибирь».

По результатам выполненной работы опубликовано 11 печатных работ, подана заявка на государственную регистрацию программы для ЭВМ «Программный модуль – симулятор магистрального нефтепровода, версия 1.0». Работа была поддержана компанией АО «Транснефть – Западная Сибирь» корпоративной стипендией для студентов ВУЗов-партнеров.

# 1 Обзор подходов и инструментов построения гидравлических моделей магистральных трубопроводов

## 1.1 История развития представлений о гидравлических процессах в трубопроводах

В России первый нефтепровод был построен в 70-х годах XIX вв. Дальнейшее развитие трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов привело к увеличению общей протяженности МН, общего диаметра, увеличению количества составных частей, элементов, технологического оборудования и перекачивающих станций МН. В связи с этим усложнились условия обеспечения безопасности энергоэффективности и других технологических параметров при эксплуатации МН. Для обеспечения технологических параметров на должном уровне появилась необходимость использовать гидравлические расчеты на пропускную способность, прочностных характеристик МН и других технологических параметров. Основой данных расчетов является гидравлика – прикладная наука о законах движения, равновесии жидкостей и способах приложения этих законов к решению задач инженерной практики [1].

Изначально при проектировании и эксплуатации МН использовались модели установившегося течения жидкости, позволяющие рассчитывать зависимость давления в трубопроводе в зависимости от скорости течения жидкости. Одним из основоположников гидравлики был Даниил Бернулли. В своем труде «Гидродинамика» он вывел основное уравнение стационарного движения несжимаемой жидкости (уравнение Бернулли), лежащее в основе динамики жидкостей и газов

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = const, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость течения жидкости в трубопроводе, м/с;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$h$  – напор, м;

$p$  – давление, Па.

Константа в правой части часто называется полным давлением. Согласно закону Бернулли, полное давление в установившемся потоке жидкости остается постоянным вдоль этого потока [1].

Полное давление состоит из весового  $\rho gh$ , статического  $p$  и динамического  $\frac{\rho v^2}{2}$  давлений.

Из закона Бернулли следует, что при уменьшении сечения трубопровода, из-за возрастания скорости, то есть динамического давления,

статическое давление падает. Закон Бернулли справедлив и для ламинарных потоков газа.

Позднее Юлиус Людвиг Вейсбах сделал открытие о неполном сжатии струи воды при истечении через отверстия и трубки принадлежит к одним из наиболее важных успехов гидравлики после Бернулли. Практические коэффициенты, выведенные Вейсбахом из наблюдений над истечением воды через щитовые отверстия и протокам по трубам, в значительной степени упрощают все расчеты по этой части гидравлики.

Совместно с Дарси предложил формулу для расчета потерь напора на трение по длине трубопровода

$$\Delta h = \lambda \frac{L v^2}{d 2g}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления;

$L$  – длина трубопровода, м;

$d$  – диаметр, м;

$v$  – то же, что и в формуле (1);

$g$  – то же, что и в формуле (1).

В 1876—1883 гг. Осборн Рейнольдс экспериментально установил критерий перехода ламинарного режима движения жидкости, текущей в цилиндрической трубе, в турбулентный режим; данный критерий заключается в том, что введённая Рейнольдсом безразмерная величина превышает некоторое критическое значение

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (3)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса;

$\nu$  – вязкость, Ст;

$v$  – то же, что и в формуле (2);

$d$  – то же, что и в формуле (2).

В 1886 году Рейнольдс развил гидродинамическую теорию смазки, предложил дифференциальное уравнение, характеризующее распределение давления в вязкой жидкости, которая заполняет собой зазор между поверхностями вала и подшипника [1]. Также он исследовал явления кавитации, групповой скорости распространения волн на свободной поверхности жидкости, теплопередачи от стенок сосуда к жидкости. Определил механический эквивалент теплоты. Сконструировал ряд турбин и центробежных насосов.

В 1845 г. Сэр Джордж Габриель Стокс в работе «О теории внутреннего трения в движущихся жидкостях и о равновесии и движении упругих твёрдых тел» вывел дифференциальные уравнения, описывающие течения вязких (и, в



общем случае, сжимаемых) жидкостей, ныне называемые уравнениями Навье – Стокса [1].

Рассматривая жидкость как сплошную среду, Стокс обратился к понятию внутреннего трения, и его трактовка данного явления стала обобщением трактовки Ньютона. Опираясь на свои результаты, Стокс внёс поправки в выполненный ранее Ньютоном анализ задачи о вращении вязкой жидкости в цилиндре. Как показал Стокс, ошибка, допущенная Ньютоном при решении данной задачи, заключалась в том, что последний вместо моментов сил трения, действующих на внешнюю и внутреннюю поверхности каждого из мысленно выделяемых в жидкости цилиндрических слоёв, рассматривал сами эти силы. В результате у Ньютона оказывалось, что время одного оборота жидкой частицы зависит от радиуса цилиндрического слоя линейно, а из результатов Стокса следует, что данное время пропорционально квадрату радиуса [1].

Павел Иванович Тугунов внес существенный вклад в развитие гидравлики, разработав технологию последовательной перекачки нефтей и нефтепродуктов, высоковязких нефтей в смеси с маловязкими разбавителями, газонасыщенных жидкостей. Павел Иванович предложил способы предотвращения парафинизации трубопроводов, их тепло- и гидроизоляции, улучшения реологических свойств перекачиваемых продуктов с помощью присадок, вибровоздействия, термообработки и других методов.

Огромный вклад в развитие гидравлики внесли советские ученые. Профессора И.А. Чарный, В.Н. Щелкачев, Б.Б. Лапук создали первые учебники по гидравлике и организовали чтение курса технической гидромеханики, в прикладном отношении направленный на изучение основ движения жидкости в трубопроводах и аппаратах. Преподавание гидромеханических дисциплин сосредоточено на кафедре нефтегазовой и подземной гидромеханики, созданной выпускником МГУ им. М.В. Ломоносова И.А. Чарным в 1946 г. Отличительной особенностью организации работы этой кафедры было сочетание в составе преподавателей выпускников МГУ и РГУ нефти и газа, что позволяло поддерживать на высоком уровне фундаментальность гидромеханического образования инженеров и тесную связь с развитием нефтегазовой науки.

Большое значение при этом имело тесное сотрудничество с кафедрой гидромеханики МГУ под руководством академика Л.И. Седова. Выпускники этой кафедры и МГУ профессора И.А. Астрахан, В.М. Максимов, В.И. Марон, М.В. Лурье внесли существенный вклад в создание научно-методических дисциплин в нефтегазовых вузах. Неоценимое участие в развитии гидромеханических исследований нефтегазового образования имеет постоянное сотрудничество с академиком РАН С.С. Григорьяном. Вместе с тем выпускники РГУ нефти и газа им. Губкина – профессора Б.Б. Лапук, В.А. Юфин, А.К. Курбанов, М.В. Филинов, В.Н. Николаевский, доценты А.Е. Евгеньев, А.М. Власов, В.Г. Иванников успешно развивали как

фундаментальные, так и прикладные задачи нефтегазовой гидромеханики, а также оригинальную учебно-лабораторную базу [2].

## 1.2 Математические модели течения жидкости в трубопроводе

Математическая физика изучает процессы реального мира с помощью математических моделей, которые получаются на основе законов физики. Любая математическая модель является приближенной, не адекватной полностью тому процессу, который она описывает. При составлении математической модели стремятся к тому, чтобы она наиболее полно отражала сам процесс. Однако математическая модель должна быть достаточно простой для изучения, должна давать возможность извлечь из нее доступными методами полезную информацию о процессе. Поэтому какие-то факторы, влияние которых на процесс мало, неизбежно не учитываются, и они оказываются не представленными в математической модели. Математическая модель включает в себя замкнутую систему уравнений и дополнительные условия, которые состоят из начальных распределений (начальных условий) и краевых (граничных) условий. Таким образом, рассмотрение задач математической физики сводится к исследованию начально-краевых задач для систем уравнений, как правило, в частных производных.

В зависимости от своего назначения выделяют следующие типы моделей МН:

– модели статических процессов в трубопроводе (используются для расчета установившихся режимов магистрального нефтепровода и основанные на уравнении Бернулли);

– модели гидродинамических процессов (необходимы для описания переходов между технологическими режимами и основанные на уравнениях Навье – Стокса).

Для описания непрерывных процессов, протекающих в трубопроводах, используются дифференциальные уравнения Навье-Стокса. Однако на сегодняшний день не существует аналитического решения данных уравнений. Одной из семи «проблем тысячелетия» является доказательство или опровержение существования глобального гладкого решения задачи Коши для уравнений Навье-Стокса. Нахождение общего аналитического решения системы Навье-Стокса для пространственного или плоского потока осложняется тем, что оно нелинейное и сильно зависит от начальных и граничных условий. В связи с чем для решения уравнений Навье-Стокса используется численное моделирование. Наиболее эффективными и универсальными вычислительными алгоритмами для их решения являются методы конечных разностей и конечных объемов.

При применении методов конечных разностей или конечных объёмов, область непрерывного изменения аргумента, в которой отыскивается решение дифференциальных уравнений, заменяется расчетной сеткой – дискретным множеством точек, соединенных непересекающимися отрезками. Расчетную

сетку можно трактовать как разбиение области на ячейки. В конечно-разностных методах решение отыскивается в узлах сетки. В методах конечных объемах – в «центрах» ячеек. Главной проблемой метода конечных разностей является построение правильной разностной схемы, которая будет сходиться к решению. Построение схемы выполняется исходя из свойств исходного дифференциального оператора [3, 4].

### 1.2.1 Математические модели установившегося течения жидкости

Гидравлической ( $Q-H$ ) характеристикой участка трубопровода называется зависимость разности пьезометрических напоров  $(p_1 - p_2) / \rho g$  в начале и конце участка от расхода  $Q$  транспортируемой жидкости [5]. Уравнениями для расчета разности давлений между двумя сечениями линейной части трубопровода являются

$$\begin{cases} \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + (z_1 - z_2) = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} + h_m, \\ v_1 = v_2 = \frac{4Q}{\pi d^2}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $Q$  – объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;

$p_1$  и  $p_2$  – давление в начале и конце трубопровода соответственно, Па;

$z_1$  и  $z_2$  – геодезические отметки трубопровода, м;

$v_1$ ,  $v_2$ ,  $v$  – скорость течения жидкости в трубопроводе, м/с;

$\varepsilon$  – относительная шероховатость;

$\Delta$  – абсолютная шероховатость, м;

$\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$h_m$  – потери напора на местных сопротивлениях, м;

$g$  – то же, что и в формуле (1);

$\lambda$  – то же, что и в формуле (2);

$L$  – то же, что и в формуле (2);

$d$  – то же, что и в формуле (2).

Относительная шероховатость

$$\varepsilon = \Delta / d, \quad (5)$$

где  $d$  – то же, что и в формуле (1);

$\Delta$  – то же, что и в формуле (1).

Потери напора на местных сопротивлениях

$$h_m = \sum_k \zeta_k \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (6)$$

где  $\sum_k \zeta_k$  – сумма местных сопротивлений МН;

$g$  – то же, что и в формуле (1);

$v$  – то же, что и в формуле (1).

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  зависит от характера течения жидкости, расчёт коэффициента осуществляется по эмпирическим формулам, представленным в таблице 1 [5].

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	$\lambda = \frac{64}{Re}$ ,	$Re < 2320$ ,
Переходный турбулентный	$\lambda = \frac{64}{Re}(1-\gamma) + \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}}\gamma^*$ ,	$2320 < Re < 10000$ ,
Развитый турбулентный	$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}}$ ,	$10000 < Re < \frac{27}{\varepsilon^{1.141}}$ ,
Зона смешанного трения	$\lambda = 0,11 \left( \varepsilon + \frac{64}{Re} \right)^{0,25}$ ,	$\frac{27}{\varepsilon^{1.141}} < Re < \frac{500}{\varepsilon}$ ,
Зона квадратичного трения	$\lambda = 0,11\varepsilon^{0,25}$ ,	$Re > \frac{500}{\varepsilon}$ .

$\gamma$  – коэффициент перемежаемости

Коэффициент перемежаемости рассчитывается по следующей формуле

$$\gamma = 1 - e^{-0,002(Re-2320)}, \quad (7)$$

где  $Re$  – то же, что и в формуле (3).

На практике уравнение система уравнений (4) заменяется уравнением баланса напоров для одного линейного участка нефтепровода

$$[z_n + h_n + F(Q)] - [z_k + h_k] = i(Q) \cdot L = \lambda \cdot \frac{Lv^2}{d \cdot 2g}, \quad (8)$$



$$(h_{n,1} - h_k) + \sum_{j=1}^{j=m} F_j(Q) = (z_k - z_1) + \sum_{j=1}^{j=m} h_{j-(j-1)}(Q), \quad (10)$$

где  $h_{n,1}$  – то же, что и в формуле (9);

$m$  – то же, что и в формуле (9);

$F(Q)$  – то же, что и в формуле (8);

$h_{j-(j-1)}$  – то же, что и в формуле (9);

$z_k$  – то же, что и в формуле (8);

$h_k$  – то же, что и в формуле (8);

$Q$  – то же самое, что и в формуле (4).

Это уравнение служит для определения расхода  $Q$  жидкости (пропускной способности трубопровода), поскольку все неизвестные подпоры  $h_{nj}$ , перед промежуточными перекачивающими станциями оказались исключенными [5].

Следует иметь в виду, что найденный из уравнения (10) расход  $Q$  может быть реализован в рассматриваемом трубопроводе только в том случае, если подпоры  $h_{nj}$ , всех промежуточных станций будут больше минимально допустимого (гарантирующего бескавитационную работу насосов), а давления во всех сечениях трубопровода – меньше максимально допустимого, определяемого условиями прочности трубопровода.

2-е следствие – уравнение для подпоров на НПС. Почленное сложение друг с другом только первых  $s$  ( $s < m$ ) уравнений системы (9) дает уравнение для определения подпора  $h_{n,s}$  перед  $s$  промежуточной НПС

$$h_{n,s} = h_{n,1} + (z_k - z_1) + \sum_{j=1}^{j=m} [F_j(Q) - h_{j-(j-1)}(Q)], \quad (11)$$

где  $h_{n,1}$  – то же, что и в формуле (9);

$z_k, z_1$  – то же, что и в формуле (8);

$F(Q)$  – то же, что и в формуле (8);

$h_{j-(j-1)}$  – то же, что и в формуле (9);

$Q$  – то же самое, что и в формуле (4).

Расход  $Q$ , входящий в это уравнение, считается известным; он находится из уравнения (10). При расчете потерь напора на участках трубопровода необходимо учитывать возможность существования на этих участках перевальных точек и самотечных сегментов [5].

В случае если в трубопроводе находится отвод, то расход и напор в трубопроводе определяются по правилам Киргофа:

– Согласно первому правилу Киргофа алгебраическая сумма объемных расходов в каждом узле трубопровода равна нулю. При этом направленный к

узлу поток принято считать положительным, а направленный от узла — отрицательным

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0, \quad (12)$$

– Согласно второму правилу Киргофа алгебраическая сумма напоров на всех ветвях, принадлежащих любому замкнутому контуру, равна нулю.

В качестве примера решим задачу № 80 из источника [5]. Нефтепровод с протяженностью  $L = 450$  км состоит из трех линейных участков, данные о которых представлены в таблице 2.

Таблица 2 – параметры линейной части МН

$L$ , км	$d$ , мм	$\delta$ , мм	$z_n$ , м	$z_k$ , м
150	720	8	50	60
180	720	8	60	70
120	720	8	70	180

Подпор  $h_n$  головной нефтеперекачивающей станции равен 50 м, а напор  $h_k$  в конце трубопровода 30 м. В начале каждого линейного участка находится нефтеперекачивающая станция с двумя одинаковыми последовательно соединенными насосами, характеристики которых даны в таблице 3.

Таблица 3 – параметры насосов НПС

Марка насоса	$(Q - H)$ характеристика	Кавитационный запас
НМ 2500-230	$H = 251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$	40
НМ 3600-230	$H = 251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$	40
НМ 5000-210	$H = 251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2$	40

Определить пропускную способность нефтепровода при перекачке нефти ( $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu = 30 \text{ сСт}$ ), а также подпоры промежуточных нефтеперекачивающих станций. Ответ  $Q = 1832 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $H_1 = 52,7 \text{ м}$ ,  $H_2 = 48 \text{ м}$ .

Уравнения баланса напоров для участков трубопровода имеют вид

$$\begin{cases} [50 + 50 + 2 \cdot (251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2)] - [60 + h_{n2}] = \lambda \frac{150000}{0,704} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}, \\ [60 + h_{n2} + 2 \cdot (285 - 0,64 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2)] - [70 + h_{n3}] = \lambda \frac{180000}{0,704} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}, \\ [70 + h_{n3} + 2 \cdot (236 - 0,48 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2)] - [180 + 30] = \lambda \frac{120000}{0,704} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot 9,81}, \end{cases} \quad (13)$$

Здесь учтено, что вследствие неизменности диаметра трубопровода при переходе от одного участка к другому, скорость перекачки и коэффициенты гидравлического сопротивления участков одинаковы;  $h_{n2}$ ,  $h_{n3}$  – подпоры промежуточных станций, заранее неизвестные и подлежащие определению.

Сложив почленно исходные уравнения, получим

$$1434 = v^2 \cdot (32579 \cdot \lambda + 75,8), \quad (14)$$

Это уравнение решаем методом итераций. В качестве приближения принимаем

$$\lambda = 0,0234.$$

Тогда из уравнения находим

$$v = 1,308 \text{ м/с}.$$

Из первого уравнения формулы (13) определяем

$$[50 + 50 + 2 \cdot (251 - 0,812 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2)] - [60 + h_{n2}] = \lambda \frac{150000}{0,704} \cdot \frac{1,308^2}{2 \cdot 9,81},$$

откуда находим

$$h_{n2} = 52,7 \text{ м}.$$

Аналогично из второго уравнения формулы (13) находим

$$h_{n3} = 48 \text{ м}.$$

Оба найденных подпора промежуточных нефтеперекачивающих станций удовлетворяют требованиям кавитационного запаса, поэтому найденный режим перекачки реализуем.



### 1.2.1 Математические модели неустановившегося течения жидкости

Неустановившимися (или нестационарными) процессами в нефтепроводах называются такие процессы, в которых характеристики потока нефти изменяются не только от сечения к сечению, но и в каждом сечении в зависимости от времени  $p(x,t)$ ,  $Q(x,t)$ .

Неустановившиеся процессы в трубопроводах возникают при пусках и остановках перекачки, включении и отключении отводов, работе запорной и регулирующей аппаратуры, а также при различных авариях – разрывах трубы и закупорах [3, 5].

Для слабо сжимаемых жидкостей, каковыми является нефть и нефтепродукты, неустановившиеся течения при полном заполнении трубопровода жидкостью описываются дифференциальными уравнениями с частными производными

$$\begin{cases} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = 0, \\ \rho \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} + \lambda \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho v(x,t)}{2} - \rho g \cdot \sin \alpha(x) = 0, \end{cases} \quad (15)$$

где  $p(x,t)$  – давление в зависимости от координаты и времени, Па;

$\partial v(x,t)$  – скорость течения жидкости в зависимости от координаты и времени, м/с;

$\alpha(x)$  – угол наклона оси трубопровода к горизонту в сечении  $x$ ;

$\lambda$  – то же, что и в формуле (2);

$g$  – то же, что и в формуле (1);

$\rho$  – то же, что и в формуле (1).

Входящий в уравнения (61) коэффициент  $c$  является скоростью распространения волн давления (и расхода) в трубопроводе. Согласно Н.Е. Жуковскому, скорость  $c$  рассчитывается по формуле

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{K} + \frac{\rho d}{E\delta}}}, \quad (16)$$

где  $K$  – модуль сжимаемости жидкости, Па;

$E$  – модуль Юнга материала, из которого изготовлен трубопровод, Па;

$\delta$  – толщина стенки трубопровода, мм;

$\rho$  – то же, что и в формуле (1);

$d$  – то же, что и в формуле (1).

### **1.3 Современные инструменты моделирования гидравлических систем, магистральных нефтепроводов**

Крупные компании нефтегазового сектора в настоящее время применяют различные инструменты для моделирования гидродинамических процессов в магистральных трубопроводах, такие как *Flowmaster V7*, *Cassandra*, гидросистема.

На сегодняшний день к инструментам для моделирования гидродинамических процессов в магистральных трубопроводах предъявляются следующие требования:

- планирование состава и режимов работающего оборудования;
- оптимизация состава включённого оборудования на характерные сутки и период планирования;
- расчёт технического, технологического минимума, ограничений мощности;
- прогнозный объём производства на характерные сутки и период планирования;
- расчет приростов стоимости загрузки нефтеперекачивающих станций (далее НПС) в рабочем диапазоне на период планирования;
- поддержка процессов управления текущими режимами;
- расчёт технико-экономических показателей текущего режима оборудования МН;
- расчет фактического и нормативного расхода электроэнергии на собственные нужды;
- автоматический сбор телеметрии с МН.

#### **1.3.1 *Flowmaster V7 General Systems***

*Flowmaster V7 General Systems* – модуль для моделирования тепловых и гидравлических систем, который используется многими компаниями в различных отраслях промышленности, в том числе в судостроении, в нефтегазовой промышленности, в электроэнергетике, в водоснабжении. *V7 General Systems* построен на платформе *Flowmaster V7 Platform*. *V7 General Systems* позволяет моделировать, оптимизировать, производить валидацию и искать неисправности в термогидравлических системах. Благодаря широкому спектру возможностей решателя и поставляемым совместно с модулем пакетом технических данных возможно проектирование концептуальных моделей уже в самом начале процесса разработки конечного продукта.

Суммарная стоимость конфигурации с учетом технической поддержки на первый год составляет 53157 Долларов США, в том числе НДС в размере 1548 Долларов США.

*Flowmaster V7 General Systems* позволяет быстро проектировать модели системы посредством использования встроенных компонентов и современного интуитивно понятного графического интерфейса. Единая база данных

позволяет осуществлять сотрудничество множества инженеров в ходе работы над проектом. Открытый программный интерфейс приложения делает возможной интеграцию *Flowmaster V7 General Systems* с программными продуктами других производителей.

Ключевые особенности *Flowmaster V7 General Systems*:

- обширная библиотека стандартных компонентов, основанная на эмпирических и расчетных данных;

- инструменты интеллектуального моделирования, помогающие избежать соединения несовместимых компонентов и использующие цветовую идентификацию полей ввода данных для указания на недостающую информацию;

- модуль для оптимизации размеров компонент исходя из условия баланса расходов, позволяющий осуществить значительную экономию средств и повысить эффективность системы;

- возможность создания пользовательских библиотек компонентов и подсистем, типичных для конкретной организации, включая возможность добавления изображений для визуального представления компонентов в модели;

- стационарное и нестационарное моделирование сжимаемой и несжимаемой среды с возможностью анализа теплообмена

- функция изменяемых параметров для параметрических исследований с использованием возможностей *Flowmaster* или посредством приложений других производителей.

- интуитивно понятный графический интерфейс, предоставляющий возможность ввода характерных данных, тем самым сокращающий вероятные ошибки, и повышающий точность результатов первое время;

- продвинутые инструменты визуализации проекта, в том числе возможность добавления фоновых изображений и возможность использования слоев для просмотра сложных систем;

- динамическая цветовая визуализация в режиме реального времени, показывающая изменения давления и скорости течений на графиках или путем изменения цвета компонентов;

- гибкие инструменты пост-процессинга позволяют сравнивать результаты различных вариантов расчета [6].

### **1.3.2 Программный комплекс *Cassandra***

*Cassandra* – это программный комплекс моделирования гидродинамических процессов в сложных, разветвленных трубопроводных системах.

При моделировании процессов в участках трубопроводов учитываются следующие факторы:

- распределенность параметров течения по длине трубопроводов;

- влияние гидростатического давления в зависимости от профиля трассы;
- возможность возникновения самотечных участков;
- нелинейная зависимость потерь давления от скорости течения жидкости.

При моделировании работы регуляторов реализован ПИД алгоритм управления.

При моделировании работы насосов используются реальные напорные и мощностные характеристики.

При моделировании местных сопротивлений используется квадратичная зависимость перепада давления от расхода.

Программа позволяет пользователю в интерактивном режиме создавать и редактировать расчетную схему моделируемой системы.

Для этого в программе предусмотрен режим Построения, находясь в котором пользователь из набора элементов (участков трубопроводов, развилки, запорных вентилей, насосов, обратных клапанов, резервуаров, регуляторов) может собрать расчетную схему любой трубопроводной системы.

Собрав расчетную схему, пользователь переходит в режим Настройки математической модели, в котором ему предоставляется возможность внести геометрические и конструктивные характеристики элементов, задать определяемые параметры для регуляторов, осуществить привязку датчиков к рассчитываемым параметрам. Датчики могут быть настроены практически на любой параметр, это может быть и давление (или скорость, или расход) в каком-либо сечении трубопровода, и перепад давления на насосе или задвижке, или положение привода регулятора.

Помимо отображения результатов моделирования на экране реализована возможность сохранения данных в файл.

Программный комплекс *Cassandra* представляет собой инструмент, обеспечивающий пользователя возможностью построения математических моделей гидравлических трубопроводных систем различной топологии. На основе модели пользователь может проводить расчеты как стационарных, так и нестационарных процессов в таких системах, осуществлять анализ влияния характеристик отдельных элементов на характеристики системы в целом.

Средства отображения результатов расчета позволяют проводить анализ максимальных давлений во время переходного процесса, осуществлять анализ влияния характеристик отдельных элементов на характеристики системы в целом. Результаты расчета могут быть отображены графически, сохраняться в файлах. В программе есть интегрированный ОРС-сервер для возможного взаимодействия гидравлической модели с другими системами в процессе расчета.

В расчетах учитывается распределенность давления и расхода жидкости вдоль трубопровода, связанная со сжимаемостью жидкости, распределенные потери на трение, влияние на течение жидкости профиля местности, по

которой проложен трубопровод, процессы, связанные с изменением и транспортом состава и свойств жидкости, наличие противотурбулентных присадок. Кроме того, в расчетах учитывается возможность возникновения самотечных участков при снижении давления на линейном участке ниже давления насыщенных паров. В программе представлены различные модели гидравлического трения, модели нестационарного трения, некоторые эмпирические модели, полученные в процессе многолетнего опыта работы с математическими моделями трубопроводов и сравнения результатов расчета с реальными измерениями.

Однако, несмотря на все ее достоинства, программа слишком дорогая и неспособна работать в режиме реального времени [7].

### **1.3.3 Программный комплекс Гидросистема**

«Гидросистема» – программа, используемая для проектирования и реконструкции объектов в энергетике, нефтеперерабатывающей и нефтехимической, газовой, нефтяной, химической и других отраслях промышленности, для расчета технологических, магистральных трубопроводов, тепловых, газораспределительных и других инженерных сетей. Программа позволяет рассчитывать надземные, подземные и комбинированные трубопроводные системы произвольной сложности (в том числе с кольцевыми участками). Результаты расчета помогают правильно выбрать насосы, компрессоры, регулирующие и предохранительные клапаны, обеспечить работоспособность трубопроводных систем и оптимизировать капитальные затраты. Программа развивалась более 30 лет с учетом опыта эксплуатации в десятках фирм России и СНГ. Расчет переходных процессов (гидроудара)

Модуль расчета гидроудара позволяет проводить расчет переходных процессов (гидравлического удара) в произвольных трубопроводах, транспортирующих жидкие продукты, вызванных событиями закрытия и открытия арматуры, останова и запуска насосов, и различными их сочетаниями. Модуль позволяет пользователю понять характер переходного процесса и оценить опасность возможного разрушения трубопровода и возникновения кавитации. Начальное установившееся течение рассчитывается с помощью расчета изотермического течения (поверочного или проектного) или теплогидравлического расчета. Определяются и выводятся в динамике (в том числе на расчетной схеме трубопровода) давления, напоры, расходы и скорости продукта, а также максимальные и минимальные значения давления за рассчитанное время. Однако отсутствует возможность работы в режиме реального времени [8].

[изъято 58 страниц]

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е. ЛИСТ САМОАТТЕСТАЦИИ

студента Миронова Александра Геннадьевича  
тема бакалаврской работы «Разработка гидравлического симулятора  
переходных технологически режимов в магистральном нефтепроводе»

### Часть А

1. Соответствует ли тема работы Вашей специализации?
  - 1.1. Не соответствует
  - 1.2. Частично соответствует
  - 1.3. Полностью соответствует
  
2. Соответствует ли содержание работы требованиям к выпускной бакалаврской работе (см. методическое пособие)?
  - 2.1. Не соответствует
  - 2.2. Частично соответствует
  - 2.3. Полностью соответствует
  
3. Соблюдены ли в работе требования инженерных стандартов и нормативных документов?
  - 3.1. Имеются серьезные отступления от ГОСТ
  - 3.2. Имеются незначительные отступления от ГОСТ
  - 3.3. Полностью соблюдены
  
4. Используются ли в работе результаты ПНИРС?
  - 4.1. Не используются
  - 4.2. Используются в незначительной мере
  - 4.3. Темы ПНИРС и работы совпадают
  
5. Используется ли в работе современная литература (опубликованная за последние 5 лет)?
  - 5.1. Не используется
  - 5.2. Используется в недостаточном количестве
  - 5.3. Список содержит в основном современную литературу
  
6. Оцените уровень раздела по безопасности и экологичности
  - 6.1. Содержание не соответствует концепции разрабатываемого устройства
  - 6.2. Анализ выполнен не полно
  - 6.3. Анализ выполнен в полной мере
  
7. Оцените уровень экономической части работы
  - 7.1. Экономическое обоснование не отражает сущности работы
  - 7.2. Экономическое обоснование выполнено не полно

- 7.3. Разработка устройства обоснована в полной мере
8. Внедрены ли результаты работы (публикации, участие в научно-технических конференциях, макет устройства и др.)?
- 8.1. Внедрение отсутствует
- 8.2. Результаты работы докладывались на научно-технических конференциях
- 8.3. Результаты работы отмечены дипломами, грамотами, опубликованы в научных сборниках, имеется макет устройства
9. Оцените уровень экспериментальной части работы
- 9.1. Эксперименты не проводились
- 9.2. Эксперименты проводились на стандартном оборудовании
- 9.3. Эксперименты проводились с использованием изготовленного макета устройства
10. Является ли представленная работа комплексной, какова степень Вашего личного вклада?
- 10.1. Работа индивидуальная
- 10.2. Работа комплексная, однако, личный вклад четко не выделен
- 10.3. Работа комплексная, личный вклад соответствует требованиям

### **Часть В**

1. В какой степени Вы были готовы в своей бакалаврской работе использовать теоретические знания?
- 1.1. Затрудняюсь ответить
- 1.2. Используются недостаточно
- 1.3. Используются в полной мере
2. В какой степени Вы применили современные знания по науке и технике?
- 2.1. Применены недостаточно
- 2.2. Применены на теоретическом уровне
- 2.3. Применены на теоретическом и практическом уровне
3. Насколько важным Вы считаете четкое представление влияния инженерных решений на мир в целом и понимание профессиональной ответственности?
- 3.1. Не задумывался
- 3.2. Считаю важным в отдельных случаях
- 3.3. Очень важно
4. Насколько Вы удовлетворены уровнем подготовки по выбранной специальности?



- 4.1. Не удовлетворен
- 4.2. Удовлетворен в достаточной мере
- 4.3. Полностью удовлетворен

5. Насколько полно Вы представляете, какие знания требует выбранная специальность?

- 5.1. Затрудняюсь ответить
- 5.2. Нечетко представляю
- 5.3. Имею полное представление

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

\_\_\_\_\_   
подпись, дата