

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ И ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО НЕФТЕПРОВОДА

Гумеров А. Г.¹, Шутов А. А.¹, Штукатуров К. Ю.¹,
Федоров В. Т.², Стрижков И. В.³

¹ГУП «Институт проблем транспорта энергоресурсов», Уфа

²ОАО «Северные МН», Ухта

³ЗАО «Тиман-Печора», Ухта

Введение

Предлагаемая математическая модель предназначена для расчета режимов работы действующего неизотермического магистрального нефтепровода, перекачивающего нефти со сложными реологическими свойствами, подземного, надземного, наземного, подводного способа прокладки и при различных климатических условиях окружающей среды.

Следует отметить, что в настоящее время не существует методик, позволяющих проводить для действующего неизотермического магистрального нефтепровода, перекачивающего реологически сложные нефти:

- расчет по определению комбинации насосно-силового оборудования на нефтеперекачивающих станциях (режим работы НПС), обеспечивающих заданную производительность перекачки (с учетом подкачки и откачки нефти на трассе нефтепровода);
- расчеты комбинации насосно-силового оборудования на нефтеперекачивающих станциях (режим работы НПС), обеспечивающих заданную производительность перекачки;
- определение значения производительности перекачки по нефтепроводу при заданной комбинации насосно-силового оборудования на нефтеперекачивающих станциях (режима работы НПС).

В разработанной методике изложены способы решения этих задач.

Проведение расчетов по методике без применения соответствующего программного инструмента является весьма трудоемкой задачей, поэтому на основе методик разработан программный комплекс ФОПРМН (Формирование Оптимальных Плановых Режимов для Магистральных Нефтепроводов).

Программный комплекс разработан таким образом, что все исходные данные для расчета хранятся в базе данных и описывают следующие характеристики действующего магистрального нефтепровода:

- база данных по реологическим свойствам нефти заполняется по результатам проведенных испытаний отобранных проб нефти и последующей обработкой разработанным программным модулем «Модель» в составе ПК ФОПР;

- база данных по техническим характеристикам нефтепровода состоит из профиля трассы, раскладки труб, способа прокладки трубопровода, расстановки НПС и пунктов подогрева нефти, мест подкачки/откачки нефти на трубопроводе и их объем во времени, наличие лупингов на трассе нефтепровода, технологической карты защит магистральных нефтепроводов, данных по несущей способности и раскладки трубы и др.;

- база данных по теплофизическим характеристикам окружающей среды состоит из коэффициентов теплопроводности грунта и среднемесячных температур на глубине заложения оси трубы на каждом участке нефтепровода (при наличии датчиков температур на глубине оси трубопровода, последние данные могут корректироваться ручным вводом). При наличии на нефтепроводе участков с наземной, надземной и подводной прокладкой в базу данных вводятся данные о температуре воздуха, скорости ветра (наземный и надземный трубопроводы); данные о температуре и скорости воды (подводный трубопровод);

- база данных по насосно-силовому оборудованию состоит из справочника базы данных по всем применяемым насосно-силовым агрегатам на НПС со следующими техническими характеристиками: диаметром рабочего колеса на входе и на выходе, диаметром втулки рабочего колеса, шириной каналов рабочего колеса на выходе, углом наклона лопатки рабочего колеса на выходе, числом лопаток, номинальной подачей насоса, номинальным напором насоса, номинальным КПД насоса, числом оборотов вала насоса, способом подвода жидкости (односторонний или двухсторонний), $Q-H$ характеристикой (паспортные данные), $Q-\eta$ характеристикой (паспортные данные), свойствами перекачиваемой нефти (плотность, динамическая вязкость, предельное напряжение сдвига, эффективную вязкость). Для расчета фактических характеристик применяется программный модуль «PUMP», входящий в состав ПК ФОПР.

1. Технологические ограничения для моделирования режимов работы магистрального нефтепровода

Для определения значения производительности перекачки магистрального нефтепровода по заданной комбинации работающих насосных агрегатов на различных станциях (или определение технологически допустимых комбинаций работы насосных агрегатов по заданной производительности перекачки) необходимо учитывать следующие технологические ограничения (граничные условия расчета).

Технологические ограничения при производительности перекачки Q (во всех расчетах значение производительности перекачки либо задано, либо подбирается при помощи итераций) можно представить в следующем виде:

$$P_{i+1} = P_i + P_{нас i}^k(Q, k_i) - P_{дрос i} - h_i(Q); \quad (1)$$

$$P_{прием i}^{\min} \leq P_i \leq P_{прием i}^{\max}; \quad (\text{на работающей НПС}) \quad (2)$$

или

$$P_i \leq P_{прием i}^{\max}; \quad (\text{на неработающей НПС}) \quad (3)$$

$$P_i + P_{нас i}^k(Q, k_i) \leq P_{колл i}; \quad (4)$$

$$P_i + P_{нас i}^k(Q, k_i) - P_{дрос i} \leq P_{вых i} \quad (5)$$

$$P_{истин} \leq P_{нес.спос.}; \quad (6)$$

где:

i - индекс, обозначающий порядковый номер НПС;

P_i - давление в трубопроводе;

$P_{прием}^{\min}(i), P_{прием}^{\max}(i)$ - минимальное и максимальное давление на приеме НПС;

$P_{нас}^k$ - давление, развиваемое k -ой комбинацией насосов при Q ;

$P_{дрос}(i)$ - дросселируемое давление;

$h_i(Q)$ - потери давления на линейном участке НПС, включая потери на разность высотных отметок;

$P_{колл}(i)$ - максимальное давление в коллекторе;

$P_{вых}(i)$ - максимальное давление на выходе станции;

$P_{истин}$ - давление на внутреннюю стенку нефтепровода при данном режиме (истинное давление);

$P_{нес.способн.}$ - несущая способность каждой секции труб нефтепровода

Будем называть набор насосных агрегатов допустимым (недопустимым), если при таком наборе возможна (невозможна) работа нефтепровода без нарушения технологических ограничений, определенных картой защит МН. Таким образом, требуется разработать алгоритмы расчета, позволяющие решить

вышеуказанные задачи по определению режимов работы нефтепровода с учетом граничных условий (1 - 6).

2. Разработанные алгоритмы в составе ПК ФОПРМН

Для определения параметров стационарных режимов по всем комбинациям включения насосно-силового оборудования, обеспечивающего заданное значение производительности перекачки, разработаны следующие алгоритмы расчета и соответствующие блок-схемы расчетов, которые реализованы в программном модуле ПК ФОПР:

1. Алгоритм построения множества допустимых комбинаций включения насосных агрегатов для обеспечения требуемой производительности нефтепровода. Производительность может быть задана как диапазон (от Q_{\min} до Q_{\max}), или как точное значение (в этом случае подбираются допустимые режимы с дросселированием);
2. Алгоритм подбора производительности по заданному варианту включения насосных агрегатов (по «лимитирующему» участку);
3. Алгоритм перебора всех возможных комбинаций включений насосных агрегатов для выбора технологически допустимых вариантов по заданным критериям;
4. Алгоритм отбрасывания заведомо недопустимых режимов, для оптимизации скорости работы программы;
5. Алгоритмы расчета самотечных участков (для режимов с перевальной точкой).

3. Описание алгоритмов моделирования режимов работы неизотермического нефтепровода

Описание алгоритма построения множества допустимых комбинаций включений насосных агрегатов для обеспечения требуемой производительности (блок – схема представлена на рисунке 1):

Шаг 1. Задается распределение производительности перекачки по трассе нефтепровода (с учетом подкачек/откачек нефти).

Шаг 2. Вычисляется трехмерная бинарная матрица вариантов включений насосных агрегатов – каждому варианту включений насосных агрегатов соответствует матрица бинарных переменных, если в k -й комбинации насос i на

НПС j работает, то $\delta_{k,j,i} = 1$, иначе $\delta_{k,j,i} = 0$.

Шаг 3. Перебираются все возможные комбинации включенного оборудования на НПС. Для каждой комбинации проводится теплогидравлический расчет (рассчитываются потери напора на трение и температуры).

Шаг 4. Анализируется каждый режим работы по критерию принадлежности к множеству допустимых режимов работы с учетом технологических ограничений. Если режим является допустимым, то происходит пополнение множества допустимых режимов и рассматривается следующая комбинация работы насосного оборудования. Таким образом, получаем множество допустимых режимов, обеспечивающих заданное распределение производительности перекачки по трассе нефтепровода. Реальное значение производительности либо итеративно подбирается для допустимого режима, либо находится величина дросселирования на «лимитирующей» НПС, обеспечивающая заданную производительность. Заведомо недопустимые режимы не рассматриваются с помощью специальных алгоритмов, позволяющих исключить из расчета комбинации включения насосных агрегатов на НПС, по которым заранее (до расчета) известно, что они не обеспечивают заданную производительность (блок-схема на рисунке 3).

Шаг 5. Для каждой полученной комбинации работы насосных агрегатов по итеративному алгоритму подбора значения производительности определяется истинное значение производительности перекачки. Альтернативным вариантом решения задачи является подбор величины дросселирования на лимитирующей НПС, исходя из условия равенства полученной на режиме производительности с заданной.

Шаг 6. Проводится ранжирование множества допустимых режимов работы: либо по критерию минимального значения суммарного передаваемого давления на всех НПС, либо по возрастанию значения производительности перекачки по МН.

Шаг 7. Вывод ранжированного множества допустимых режимов работы в виде таблицы. По желанию пользователя параметры режимов заносятся в карту расчетных режимов.

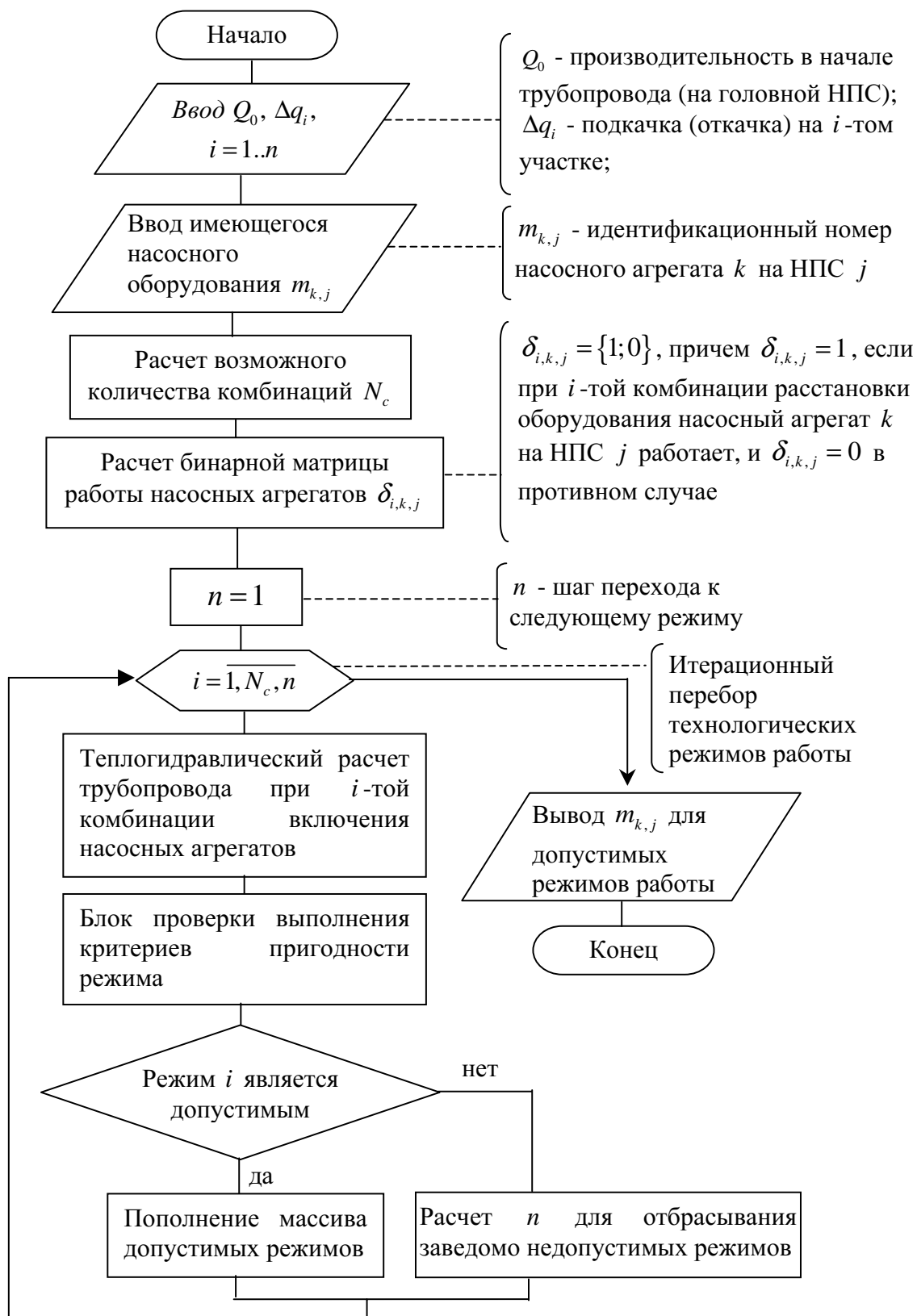
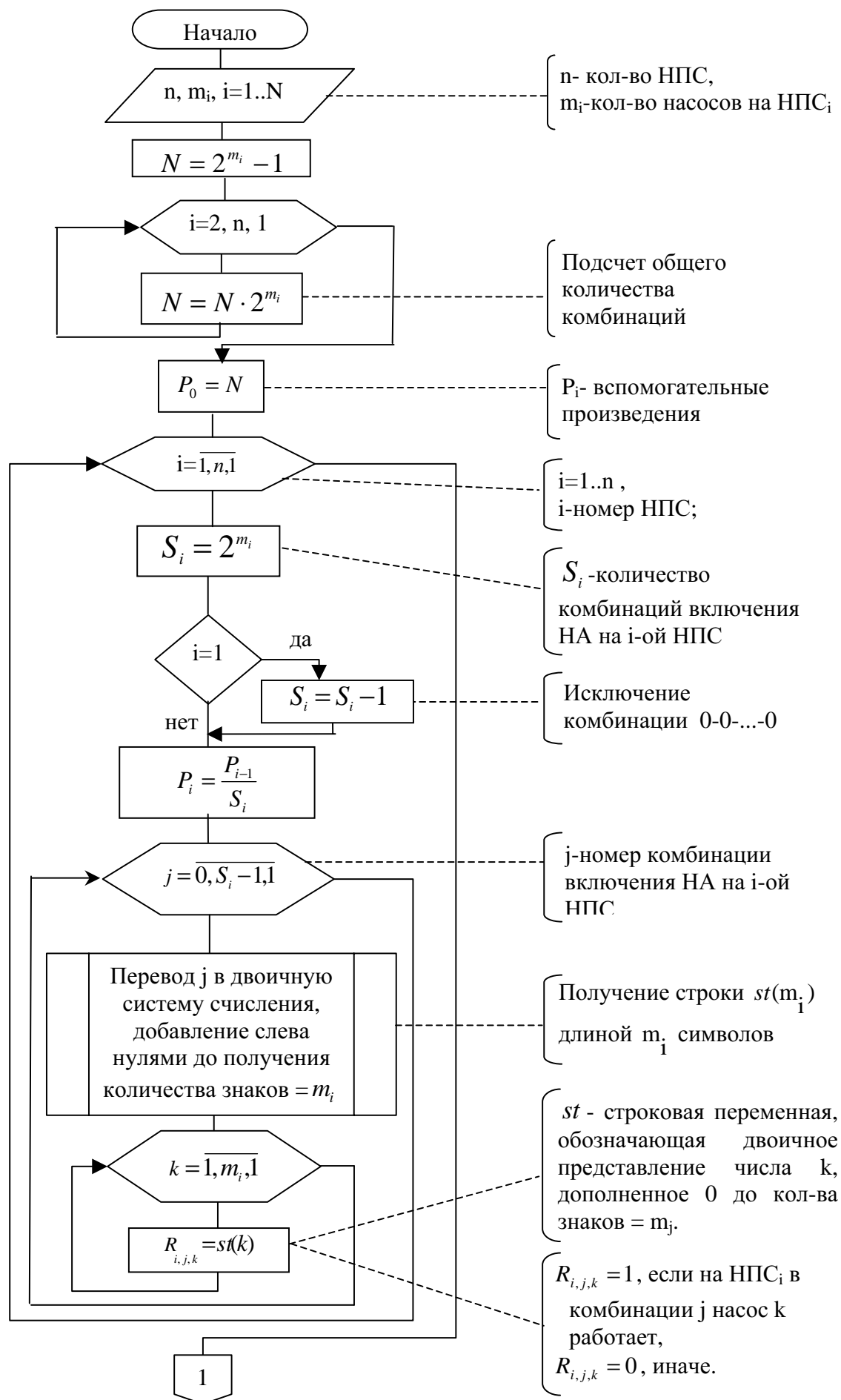


Рисунок 1 - Блок – схема подбора допустимых комбинаций включений насосных агрегатов для обеспечения требуемой производительности



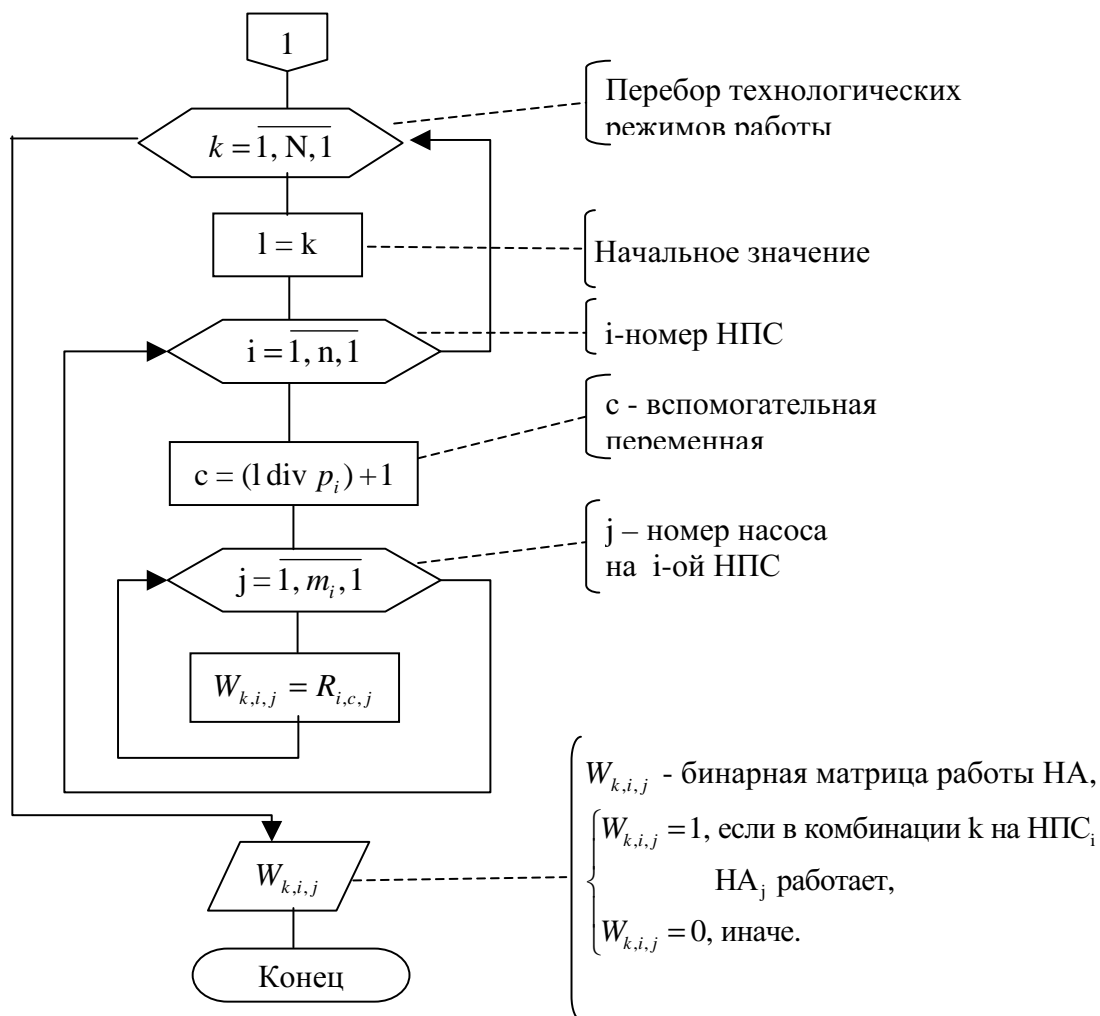


Рисунок 2 – Блок–схема перебора всех комбинаций включенного оборудования на НПС

Описание алгоритма перебора всех возможных комбинаций включенного оборудования на НПС (блок – схема на рисунке 2):

Перебор всех возможных комбинаций работы насосно-силовых агрегатов на всех НПС требует значительного времени для вычислений. Для ускорения вычислений режимы работы перебираются в обратном порядке (от последней комбинации к первой). При этом первым просчитывается режим с максимальным набором работающих насосных агрегатов. Если заданная производительность не обеспечивается набором оборудования в первой комбинации, то это означает, что допустимых режимов работы нет. Далее режимы перебираются таким образом, что режим вида 1–0–0- ... -0 оказывается последним. Такой алгоритм перебора является наиболее быстрым.

Описание алгоритма отбрасывания заведомо недопустимых с

технологической точки зрения режимов (блок – схема представлена на рисунке 3):

Данный алгоритм сводится к определению шага на переход к следующему по счету ($k=1..N$) режиму, для которого не определен критерий его принадлежности к множеству допустимых режимов работы МН. Заведомо недопустимым режимом работы назовем режим, который отличается от известного недопустимого режима работы только комбинацией включенного оборудования на НПС, расположенных после участка, на котором не выполняется критерий по принадлежности к множеству допустимых режимов работы. Для увеличения скорости работы алгоритма перебора всех возможных комбинаций работы насосных агрегатов на НПС необходимо отбрасывать заведомо недопустимые режимы, т.е. не проводить по ним теплогидравлические расчеты.

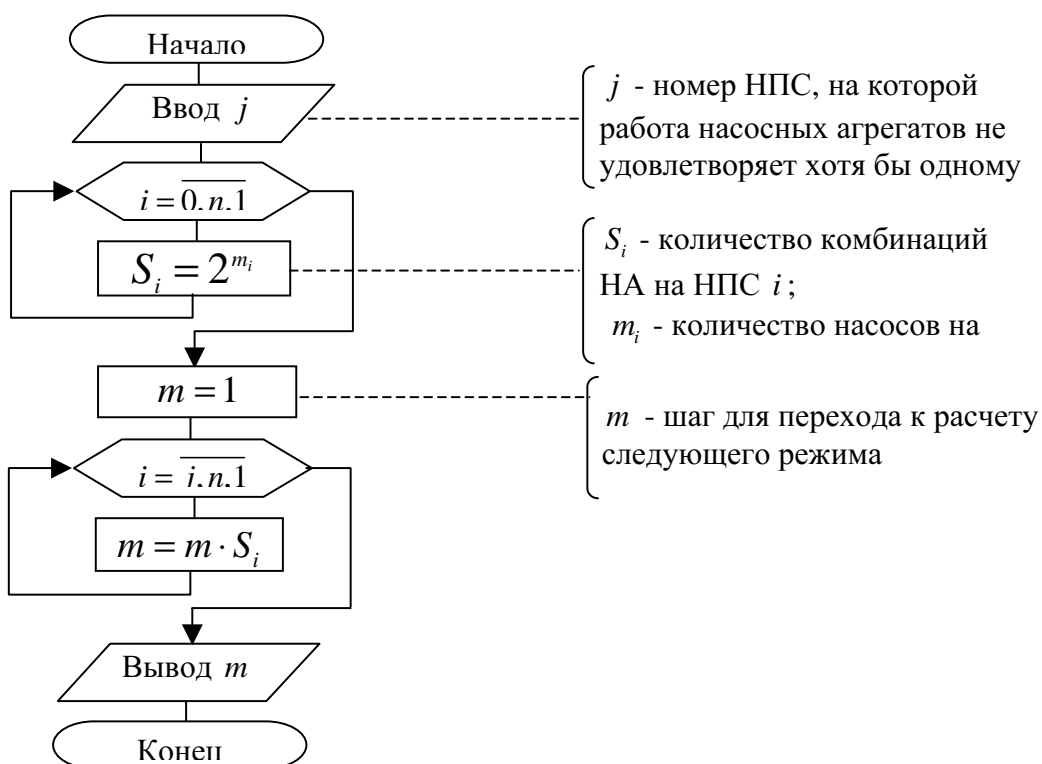


Рисунок 3 – Блок – схема отбрасывания недопустимых (по карте защит) режимов

Описание алгоритма учета перевальных точек на блок-схеме - рисунок 4.

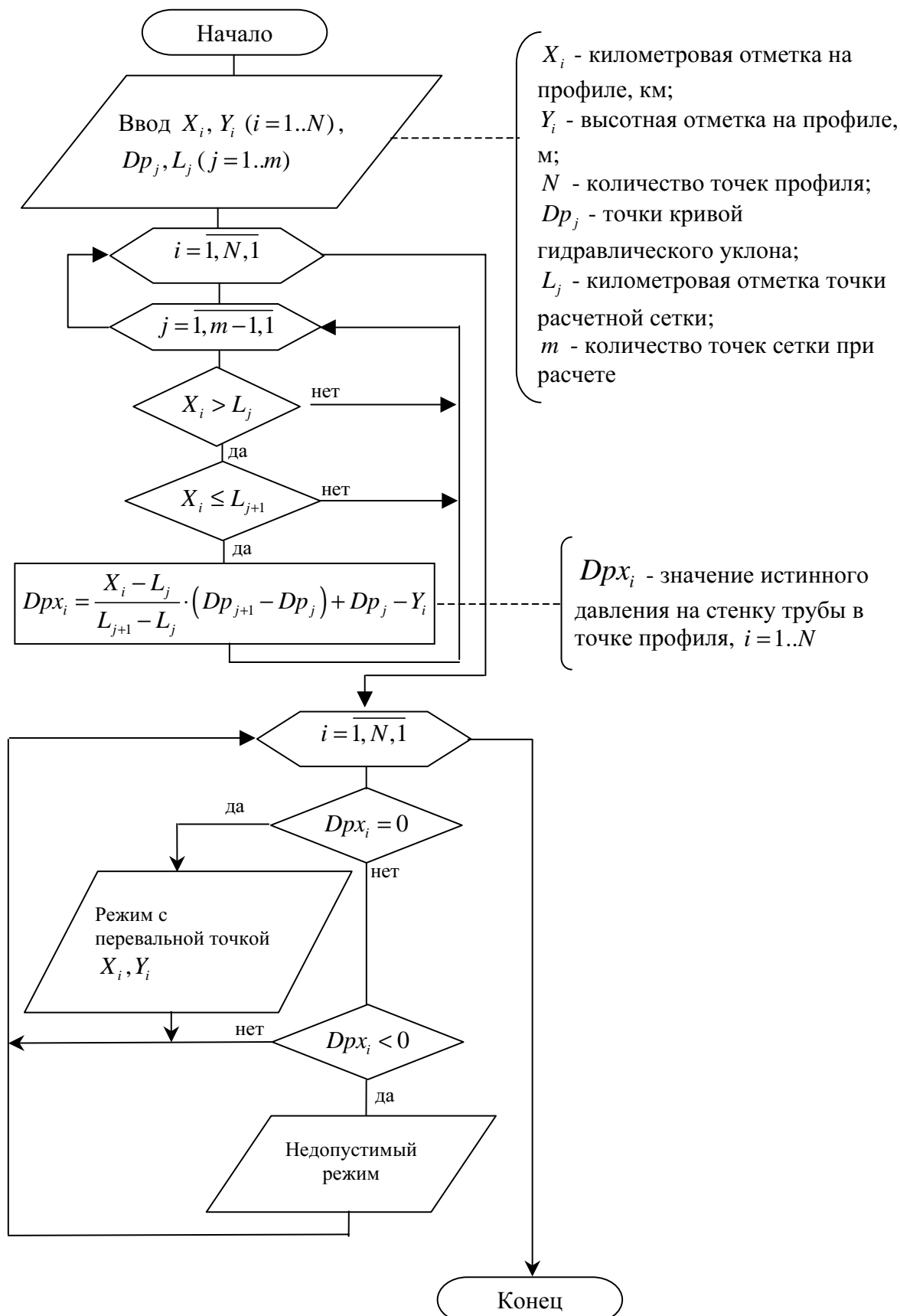


Рисунок 4 – Блок – схема алгоритма расчета режимов с учетом наличия перевальных точек при теплогидравлических расчетах

Для определения параметров стационарного режима при заданной комбинации включенного оборудования разработан алгоритм расчета (рисунок 5):

Шаг 1. Задается производительность перекачки в начале трубопровода Q_0 , а также распределения подкачек/откачек по трубопроводу $\Delta q_i, i = 1..n$. Подкачки рассматриваются как величины постоянные, варьируется только величина Q_0 .

Шаг 2. Задается расстановка насосно-силового оборудования на НПС.

Шаг 3. Проверяется возможность осуществления заданного в шаге 1 распределения значений производительностей перекачки по участкам (с учетом подкачек/откачек) с помощью заданного в шаге 2 распределения насосных агрегатов на НПС. Для этого необходимо сравнить давление на выходе НПС с потерями напора на трение (с учетом профиля) при заданном распределении производительностей $q_i, i = 1..n$. Если заданная производительность $q_i, i = 1..n$ обеспечивается имеющимся насосно-силовым оборудованием, то выход - (подбор производительности не требуется).

Шаг 4. Итеративный подбор производительности Q_0 (методом хорд) на каждом из участков от НПС до НПС до выполнения неравенства $P_i + P_{нас_i}^k(Q_i, k_i) > h_i(Q_i)$. При этом величина Q_i , подобранная на i -м участке, служит начальным приближением при подборе производительности на следующем участке от НПС до НПС. Так как на каждой итерации изменяется только варьируемая величина Q_0 , то весь остальной массив $q_i, i = 1..n$ изменяется соответственно заданным подкачкам/откачкам $\Delta q_i, i = 1..n$ и все участки от 0 до i включительно пересчитываются на новое значение производительности перекачки.

Шаг 5. Определение номера «лимитирующего» участка i по критерию $abs(P_i + P_{нас_i}^k(Q_i, k_i) - h_i(Q_i)) < \varepsilon$

Шаг 6. Заполняется карта расчетных режимов.

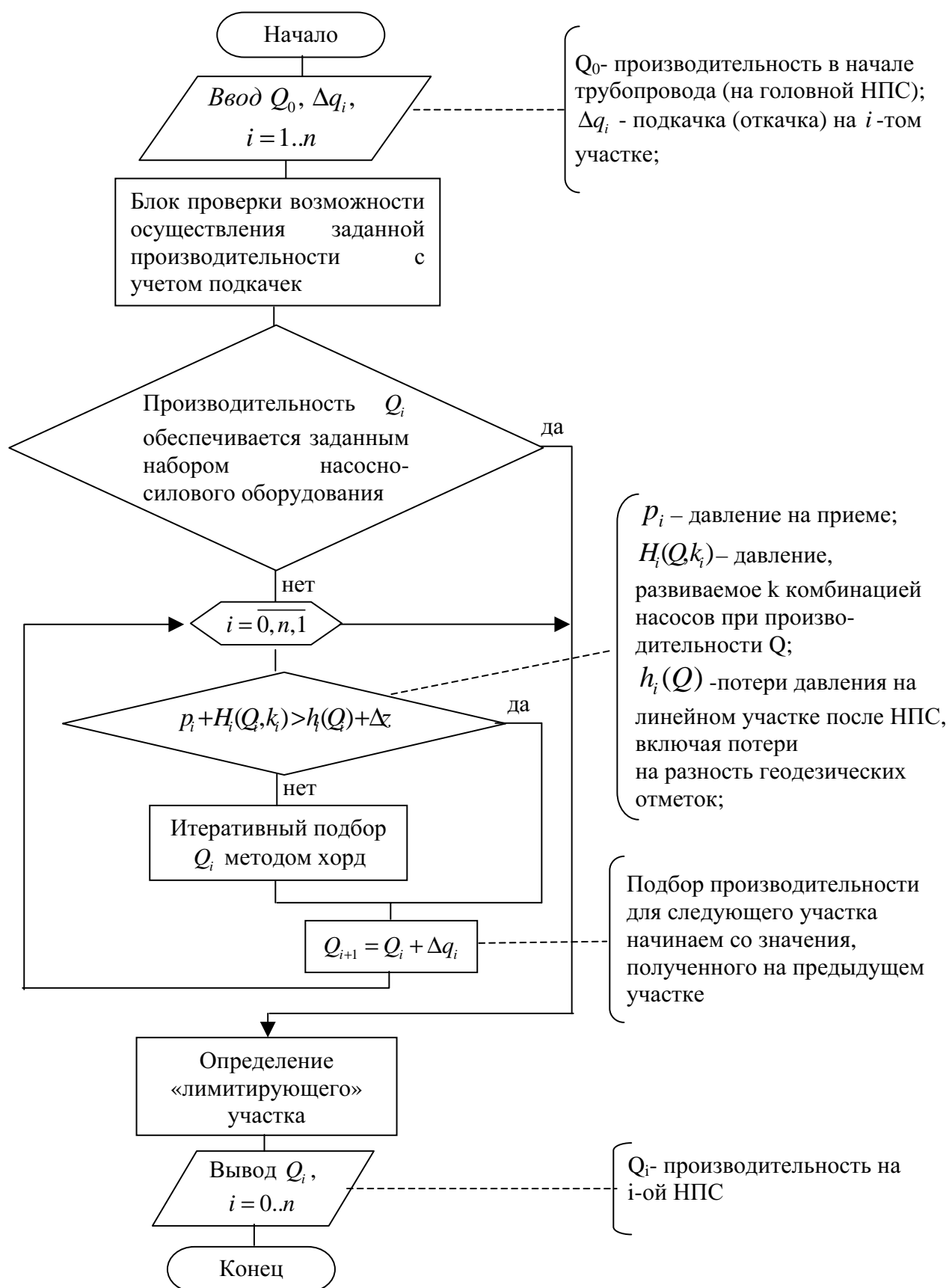


Рисунок 5 - Блок – схема подбора значения производительности перекачки по «лимитирующему» участку нефтепровода

Выводы

1. Впервые разработана методика для расчета режимов работы неизотермических магистральных нефтепроводов, транспортирующих реологически сложные нефти с учетом характеристик установленного на НПС насосно-силового оборудования.

2. На основе методики разработан программный комплекс ФОПР, позволяющий автоматизировать:

- расчет режимов магистральных нефтепроводов, обеспечивающих заданную производительность перекачки (с учетом подкачки и откачки нефти на трассе нефтепровода);

- расчет производительности режима магистрального нефтепровода по заданной комбинации, включенного насосно-силового оборудования на всех НПС.

Литература

1. Гумеров А.Г., Шутов А.А., Штукатуров К.Ю. «Программный комплекс «NIPAL»: моделирование режимов работы трубопровода, перекачивающего реологически сложные нефти» // «Нефтяное хозяйство», №6, 2004. С. 106-109.
2. Бахтизин Р.Н., Шутов А.А., Штукатуров К.Ю. «Моделирование режимов работы трубопроводов с применением комплекса программ NIPAL 3.0» Нефтегазовое дело, 2004. – 24 с.
http://www.ogbus.ru/authors/Bahtizin/Bahtizin_1.pdf
3. РД 39 - 30 - 1061 - 84. Методика расчета нестационарных технологических режимов работы неизотермических теплоизолированных магистральных трубопроводов при различных способах прокладки их в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. // Миннефтепром СССР: - Уфа, ВНИИСПТнефть, 1984. - 58 с.
4. Шутов А.А., Штукатуров К.Ю., Стрижков В.Н., Федоров В.Т. Моделирование процесса вытеснения реологически сложной нефти при пуске неизотермического трубопровода с учетом характеристик насосно-силового оборудования. // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности объектов трубопроводного транспорта углеводородного сырья / Тезисы

докладов // Научно-практическая конференция 19 мая 2004 г. – Уфа: ТРАНСТЭК, 2004. – с.27 – 28

5. Шутов А.А. Математическое моделирование переходных процессов в неизотермическом трубопроводе. // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. Сборник научных трудов - Уфа: Транстэк, 1997, - с.31-37.