

На правах рукописи

**ШТУКАТУРОВ КОНСТАНТИН ЮРЬЕВИЧ**

**ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫБОРА  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ТРУБОПРОВОДА**

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Уфа 2004

Работа выполнена на кафедре «Математическое моделирование»  
Уфимского государственного нефтяного технического университета

- НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор физико-математических наук, профессор Бахтизин Рамиль Назифович
- ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ – доктор физико-математических наук, профессор Асадуллин Рамиль Мидхатович
- доктор физико-математических наук, профессор Байков Виталий Анварович
- ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ – Институт механики УНЦ РАН

Защита состоится «\_\_» июня 2004 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета ДР 212.013.02 при Башкирском государственном университете по адресу: 450074, г.Уфа, ул. Фрунзе, 32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Башкирского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_» мая 2004 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

\_\_\_\_\_

А.М. Болотнов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** На многих месторождениях России, Казахстана и других государств добываемая нефть отличается сложными физико-химическими и реологическими свойствами, такими как высокая вязкость, содержание асфальтонов, смол и парафинов, повышенное статическое напряжение сдвига. Нефти, обладающие такими свойствами, называются реологически сложными и отличаются высокой температурой застывания, которая может быть выше температуры окружающей среды. В России такие нефти добывают на месторождениях Тимано-Печорского региона, в Казахстане – на месторождениях Узень, Жетыбай, Кумколь, Акшибулак.

В трубопроводном транспорте реологически сложной нефти, особенно в условиях Крайнего Севера, одним из важнейших является вопрос о прогнозе допустимой остановки трубопровода (по регламенту время остановки должно быть не менее 72 часов). Необходимо исключить любую возможность «замораживания» жидкости на участке трубопровода. Для этого требуется либо внести в поток жидкости дополнительную тепловую энергию, либо воздействовать на нефть химическим путем. Это, в свою очередь, связано с применением специальных технологий: подогрев нефти с помощью печей, попутный электроподогрев, введение депрессорной присадки или разбавителя, улучшающих физико-химические свойства нефти, а также сочетание этих технологий.

В настоящее время трубопроводы часто работают в циклических режимах, связанных с частыми остановками. Необходимо обеспечить такую работу трубопровода, чтобы при запуске его после остановки пусковое давление не превысило предельно допустимого. Таким образом, задача выбора оптимальных с экономической точки зрения технологий для перекачки реологически сложных нефтей является актуальной.

Необходимо разработать методику, позволяющую выбирать для каждого участка трубопровода технологию транспорта нефти в зависимости от условий перекачки, а также оптимизировать затраты на ее применение с тем, чтобы суммарные затраты на транспорт реологически сложной нефти были минимальными.

**Целью работы** является методическое обоснование выбора технологий трубопроводного транспорта реологически сложной нефти и объема применения этих технологий в стоимостном выражении на каждом из участков трубопровода для повышения экономической эффективности работы неизотермического нефтепровода.

**Для этого были поставлены и решены следующие задачи:**

- 1) разработка алгоритмов моделирования различных режимов работы трубопровода с учетом реологической модели жидкости;
- 2) разработка программного обеспечения для моделирования режимов работы трубопровода;
- 3) разработка методики оптимизации выбора технологий с целью максимизации прибыли предприятия.

**На защиту выносятся:**

- 1) математическая модель режимов работы неизотермического трубопровода;
- 2) алгоритм определения затрат на перекачку нефти при применении различных технологий для увеличения объемов перекачки;
- 3) методика выбора экономически оптимальной технологии перекачки реологически сложной нефти на каждом из участков рассматриваемого трубопровода.

**Научная новизна работы:**

- 1) математическая модель режимов работы неизотермического нефтепровода с учетом особенностей течения аномальных жидкостей;
- 2) методика выбора экономически оптимальной технологии трубопроводного транспорта реологически сложной нефти.

**Практическая ценность работы.** На основе предложенных экономико-математических моделей разработаны рекомендации для повышения эффективности работы трубопроводного транспорта, снижения потребления энергоресурсов, повышения надежности и безопасности действующих нефтепроводов Уса – Ухта (Россия, Республика Коми); Кумколь – Каракоин - Шымкент, Кумколь – Каракоин – Атасу, Узень – Атырау - Самара (Республика Казахстан - Россия).

Разработано программное обеспечение для моделирования режимов работы неизотермического нефтепровода с использованием современного интерфейса и баз данных (свидетельство о регистрации № 2003611947).

Математическое моделирование режимов работы трубопровода (пусковой и стационарный режимы работы, остановка трубопровода) реализовано в виде программного комплекса NIPAL (Non-Isothermal Pipeline for Abnormal Liquids), позволяющего проводить моделирование перечисленных режимов работы неизотермического трубопровода. Имеется справка о внедрении программного комплекса NIPAL в ООО «ПермНИПИнефть».

Для ЗАО «КазТрансОйл» (Восточный филиал) выработаны рекомендации по режимам работы нефтепроводов Кумколь-Каракоин-Шымкент, Кумколь-Каракоин-Атасу (Республика Казахстан), которые включены в Инструкцию по технологии перекачки застывающих нефтей с депрессорными присадками (РД 39 – 087 – 03).

### **Апробация работы**

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на:

- конференции «Перспективы развития трубопроводного транспорта России» в рамках Десятой международной специализированной выставки «Газ. Нефть – 2002» (22 мая 2002 г., г. Уфа);
- Международной научно-технической конференции «Трубопроводный транспорт – сегодня и завтра» (сентябрь 2002 г., Институт проблем транспорта энергоресурсов (ГУП «ИПТЭР»), г. Уфа);
- I конкурсе научных работ молодых ученых и аспирантов АН РБ и УНЦ РАН (ноябрь 2002 г., Институт нефти и катализа (ИНК), г. Уфа);
- совместном городском семинаре по вычислительной математике Института математики с ВЦ и БГПУ (руководители: проф. М.Д. Рамазанов, проф. Р.М. Асадуллин, май 2004 г., ИМ с ВЦ, г. Уфа);
- I Всероссийской научной Internet-конференции «Интеграция науки и высшего образования в области био- и органической химии и механики многофазных систем (декабрь 2002 г., г. Уфа);

- IV конгрессе нефтегазопромышленников России, секция «Энергоэффективные технологии» (20-23 мая 2003 г., г. Уфа);
- II конкурсе научных работ молодых ученых и аспирантов АН РБ и УНЦ РАН (декабрь 2003 г., Институт механики УНЦ РАН, г. Уфа).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 2 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Общий объем работы – 130 с. Библиография включает 103 наименования.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснованы актуальность и важность проблемы повышения экономической эффективности работы неизотермического трубопровода, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, практическая ценность.

**В первой главе** изложено современное положение в отрасли, существующие проблемы трубопроводного транспорта реологически сложных нефтей и пути их решения на примере открытого акционерного общества «Северные магистральные нефтепроводы» (ОАО «Северные МН»). Рассмотрены современные технологии, используемые для нормальной безаварийной работы неизотермического нефтепровода. Наиболее распространенными из них на сегодняшний день являются следующие: подогрев нефти с помощью печей, попутный электроподогрев трубопровода, введение в нефть депрессорной присадки или разбавителя, смешение нефтей, использование тепловой изоляции. Эти технологии требуют значительных затрат, связанных с объемами перекачиваемой нефти, ее физико-химическими свойствами, параметрами трубопровода. Управление этими затратами напрямую зависит от финансово-экономического положения предприятия.

В числе причин низкой эффективности работы ОАО «Северные МН» важное место занимает значительное потребление электроэнергии, что подтверждает особое значение для трубопроводного транспорта исследований в

области эффективного применения технологий перекачки нефти. ОАО «Северные МН» имеет один из самых высоких в отрасли тарифов на транспорт нефти, что связано с особенностями работы трубопроводов в условиях Крайнего Севера. Поэтому предприятие вынуждено проводить гибкую тарифную политику, которая даст возможность упрочнения взаимовыгодного сотрудничества между предприятием и фирмами, пользующимися его услугами.

ОАО «Северные МН» транспортирует нефть со сложными реологическими свойствами, к которым относится высокая температура застывания. Вследствие этого в поток жидкости требуется внести либо дополнительную тепловую энергию, либо растворитель или депрессорные присадки. Серьезным вопросом при «горячей» перекачке является время допустимой остановки трубопровода. Построение математической модели, отражающей реальные тепловые и гидродинамические параметры процесса пуска, позволяет не только подобрать наиболее оптимальные режимы работы насосных агрегатов (а при проектировании - сами насосы), но и, с точки зрения оценки максимального пускового давления, определить время безопасной остановки трубопровода, тем самым исключая возможность «замораживания» участка трубопровода.

Эти технологии требуют существенных затрат, которые увеличиваются с ростом производительности трубопровода. В работе показано, что такой важнейший показатель деятельности предприятия, как прибыль, не всегда растет с увеличением объемов транспортируемой нефти. Это связано с тем, что с некоторого момента затраты на применение технологий для перекачки начинают расти быстрее, чем доход. Поэтому необходимо методически обосновать выбор технологии на каждом из участков, чтобы обеспечить максимальную прибыль предприятия при технологических ограничениях снизу по производительности трубопровода и сверху по прочности материала труб. Определение минимума затрат на транспорт реологически сложной нефти дает возможность использовать тарифную политику в целях взаимовыгодного сотрудничества между ОАО «Северные МН» и фирмами, пользующимися транспортными услугами предприятия.

**Вторая глава** посвящена разработке методики для моделирования и оптимизации режимов работы неизотермического трубопровода.

Исследованию динамики течения и процессов теплообмена при неизотермической перекачке высоковязких и высокозастывающих нефтей посвящен целый ряд работ, среди которых следует отметить работы таких авторов, как Черников В.И., Тугунов П.И., Скрипников Ю.В., Губин В.Е., Новоселов В.Ф., Юфин В.А., Марон В.И., Гаррис Н.А., Абрамзон Л.С., Тонкошкuroв Б.А., Агапкин В.М., Кривошеин Б.Л., Губин В.В., Шутов А.А., Новоселов В.В. и другие. В большинстве этих работ моделирование теплового режима трубопровода производится по методике Шухова, основанной на усреднении температур и скоростей по сечению трубопровода.

Отдельно следует выделить работы Мирзаджанзаде А.Х., Огибалова П.М., Шутова А.А., Титова Н.С., Харина В.Н. В них особое внимание уделено вопросам нестационарного движения вязкопластичных жидкостей. Опираясь на результаты исследований перечисленных авторов, в данной работе разработаны алгоритмы решения нелинейных нестационарных уравнений движения и энергии для моделирования режимов работы нефтепровода. Разработанные алгоритмы реализованы в виде программного комплекса NIPAL, который применен для моделирования режимов работы нефтепровода Уса–Ухта.

Одним из реологических свойств нефтей с высокой температурой застывания является появление предельного напряжения сдвига при низких температурах. Поэтому снижение рабочей температуры потока жидкости может привести к возникновению «застойной зоны», которая уменьшает рабочее сечение трубопровода. Из этого следует, что при моделировании режимов работы неизотермического нефтепровода традиционное усреднение температур и скоростей по сечению неприемлемо.

При появлении «застойной зоны» существуют два пути развития течения аномальной жидкости. Первый - в случае недостаточной по величине кинетической и тепловой энергии потока - «застойная зона» перекрывает



рабочее сечение трубопровода, гидравлическое сопротивление резко увеличивается, и участок нефтепровода «замораживается». Второй путь - поток жидкости имеет достаточную механическую и тепловую энергию, при которой поддерживается соответствующая производительность перекачки. Тогда при уменьшении рабочего сечения потока его скорость возрастает, соответственно возрастает и градиент скорости в районе границы «застойной зоны». Это приводит к саморазогреву жидкости в данной области (количество выделяемого тепла прямо пропорционально квадрату градиента скорости), и течение переходит в режим «гидродинамического теплового взрыва». В результате величина «застойной зоны» стабилизируется, и перекачка нефти по трубопроводу большого диаметра с малыми значениями производительности и большой потерей тепла переходит в перекачку по трубопроводу с меньшим диаметром, но теплоизолированному (коэффициент теплопроводности нефти «застойной зоны»,  $\approx 0,134 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), со значительно увеличенной скоростью течения. Появление «тепловой изоляции», увеличение скорости потока (соответственно малое время нахождения «горячей» жидкости в «холодной» окружающей среде) не позволяют остыть порции жидкости, и гидравлическое сопротивление данного участка трубопровода становится значительно меньше, чем должно быть по классической теории.

Рассмотрение «застойных зон» изменило классические представления о работе неизотермического трубопровода, позволило показать, что классическая характеристика «P-Q» (зависимость потерь напора на трение от производительности перекачки) в области малых значений производительности трубопровода даже качественно не соответствует действительности. В частности, в работах Тугунова П.И., Гаррис Н.А. приводится зависимость потерь напора на трение от производительности перекачки для маловязких нефтей (классическая зависимость, рисунок 1). Однако при транспорте реологически сложной нефти фактические данные сильно отличаются от данной зависимости, особенно в области малых значений производительности (рисунок 1).



Рисунок 1 – Зависимость гидравлического сопротивления от производительности неизотермического трубопровода

На участке неизотермического нефтепровода, в зависимости от свойств жидкости, рабочей температуры и производительности перекачки, могут быть два режима течения нефти - ламинарный и турбулентный. При турбулентном режиме жидкость течет полным сечением, перемешиваясь внутри трубопровода. При ламинарном режиме частицы жидкости движутся по траекториям, параллельным стенкам трубы, без перемешивания. При этом режиме может образоваться так называемая «застойная зона», когда жидкость у стенки трубы имеет нулевую скорость, т.е. живое сечение трубопровода сужается.

В общем случае для жидкости, обладающей предельным напряжением сдвига (бингамовский вязкопластик), эпюра скоростей в рассматриваемом сечении трубопровода при ламинарном режиме течения состоит из трех зон: застойной зоны, ядра течения с постоянными скоростями и зоны с переменными скоростями.

Критерием смены режимов течения является критическая температура, при которой число Рейнольдса достигает критического значения. Расчет критической температуры производится согласно Методике расчета параметров работы неизотермического трубопровода (РД 39-021-00) под редакцией Р.К. Адиева (ЗАО «КазТрансОйл»).

В работе проведено моделирование стационарного и пускового режимов работы неизотермического нефтепровода, перекачивающего реологически сложную жидкость по цилиндрической трубе, находящейся в окружающей среде (грунте, воздухе, воде) с температурой ниже температуры застывания данной жидкости.

Реализация математической модели состоит в решении нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений движения и энергии, основой построения которых является аппроксимационная реологическая модель, полученная путем исследования нефтей Тимано-Печорского бассейна.

Задача по моделированию режимов работы трубопровода является симметричной относительно оси трубопровода и решается в цилиндрических координатах в двумерной постановке (по радиусу и длине). Для моделирования нестационарного процесса вводятся шаги по времени.

Для численного решения задачи рассмотрим трехмерную сетку, введя безразмерные шаги по радиусу ( $h_R = \frac{1}{N_R}$ ), длине ( $h_z = \frac{L}{R_1 \cdot N_z}$ ) и размерный по времени ( $h_t = \frac{T}{N_T}$ ). Сеточная область решения задачи представлена на рисунке 2.

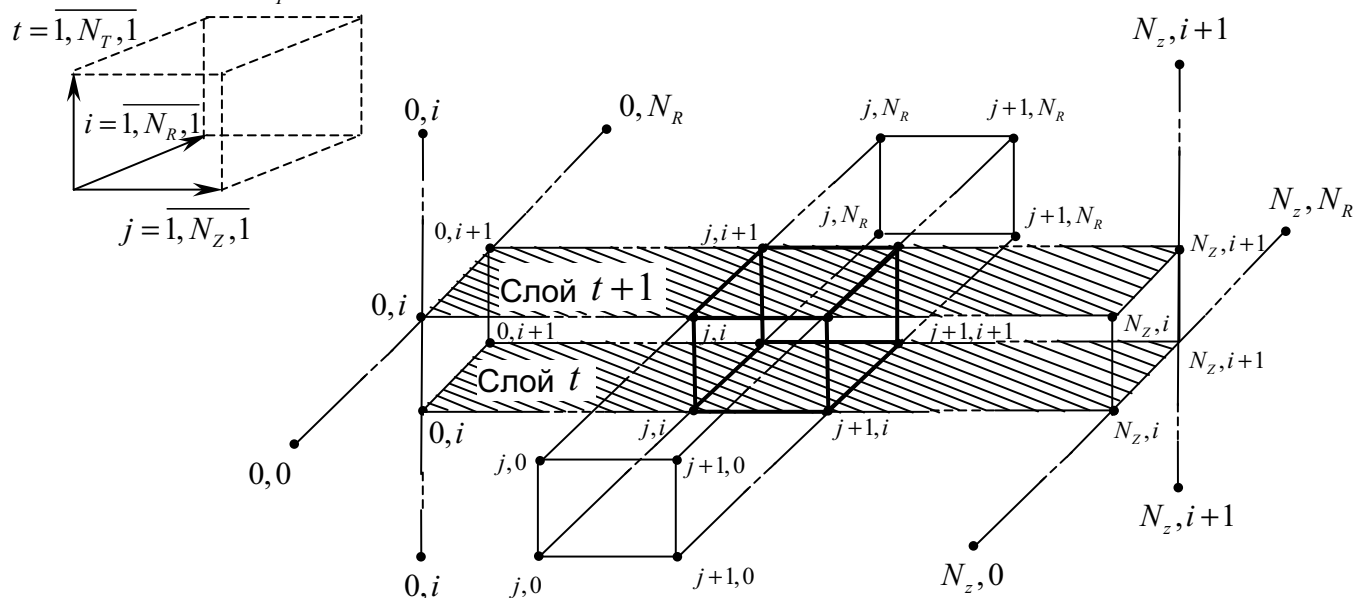


Рисунок 2 – Сеточная область решения задачи

Искомые функциями являются:

- 1) функция температуры  $T(t, z, r)$ ;
- 2) функция скорости  $W(t, z, r)$ ;
- 3) функция потерь напора на трение  $P(t, z)$ ,

где  $t$  - время, прошедшее с начала пуска,  $r$  - расстояние до стенки трубопровода,  $z$  - расстояние от начала трубопровода.

Искомые функции температуры и скорости находятся в области  $Q = \Omega \times \{t \in (0, t_p)\}$ ,  $\Omega = \{r \in (0, R); z \in (0, L)\}$ .

Моделирование различных режимов работы трубопровода проводится по следующему алгоритму: численно моделируется стационарный режим работы, в котором принимается  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ ;  $\frac{\partial W}{\partial t} = 0$ . В результате получаем температурное и скоростное поля, а также кривую гидравлического уклона. Температурное поле, полученное в результате моделирования стационарного режима работы, является начальным условием при решении задачи остывания трубопровода. При моделировании процесса остывания трубопровода  $W = 0$ , поэтому работает только уравнение теплопроводности.

При моделировании нестационарного режима работы начальными условиями могут быть либо температурное и скоростное поля, полученные при моделировании стационарного режима перекачки (моделируется переходной процесс), либо температурное поле, полученное в результате решения задачи остывания (моделируется процесс возобновления течения после остановки).

Математическая модель режимов работы неизотермического трубопровода представлена ниже.

Тепловое уравнение (уравнение энергии) для нестационарного режима работы выглядит следующим образом:

$$\frac{c_p \rho \cdot R^2}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{c_p \rho \cdot w_0 R}{\lambda} W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{R^2}{\lambda} \left[ \mu \left| \frac{w_0}{R} \frac{\partial W}{\partial r} \right|^{n+1} + \tau_0 \left| \frac{w_0}{R} \frac{\partial W}{\partial r} \right| \right] \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$T|_{z=0} = T_{0n}$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} + Bio (T - T_0) \Big|_{r=R} = 0,$$

где  $Bio = \frac{\alpha R}{\lambda}$  - безразмерный параметр Био,  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи

окружающей среды,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ ;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности нефти,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ .

Уравнение движения для ламинарного режима течения в нестационарном случае выглядит следующим образом:

$$\rho w_0 R \frac{\partial W}{\partial t} r + w_0^2 \rho \frac{\partial P}{\partial z} r = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{w_0^n}{R^n} \left| \frac{\partial W}{\partial r} \right|^{n-1} \frac{\partial W}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_0). \quad (3)$$

Граничные условия:

$$W|_{r=R} = 0 \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_{r=0} = 0,$$

начальные условия:

$$W|_{t=0} = 0, \quad (5)$$

где  $R$  - радиус,  $w_0$  - средняя скорость, м/с;  $\mu$  - вязкость жидкости, Па·с;  $\tau_0$  - предельное напряжение сдвига, Па;  $\rho$  - плотность нефти,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $C_p$  - удельная теплоемкость жидкости,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Решение уравнения движения усложняется тем, что вследствие появления «застойных зон» это уравнение имеет неопределенную область решения. Область решения находится на каждом шаге по длине отдельно путем варьирования переменной величиной  $\frac{\partial P}{\partial z}$ , которая подбирается исходя из условия постоянства расхода:

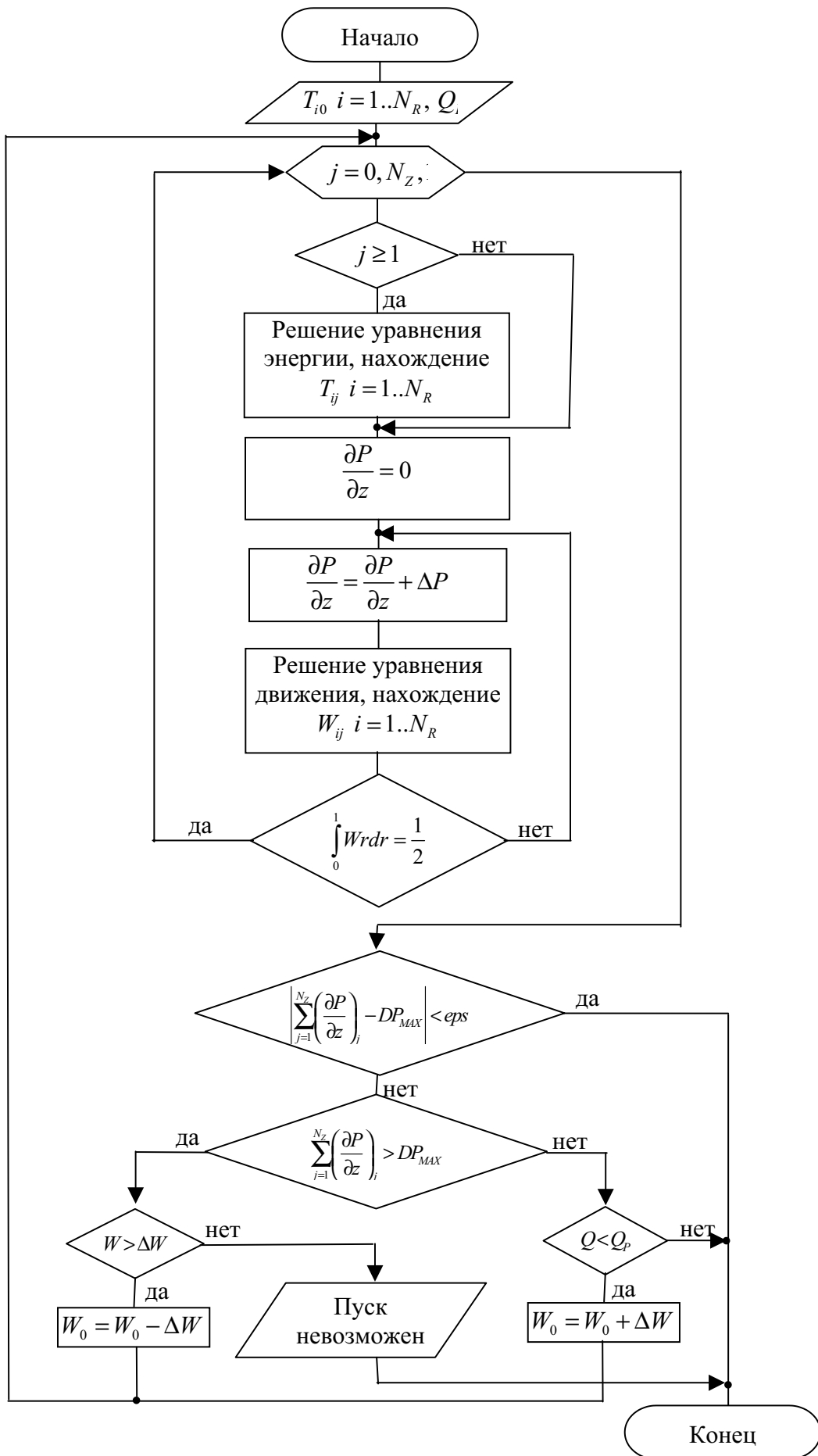
$$Q(t) = 2\pi \int_0^{R_1} W r dr = \pi w_0 R_1^2 \quad (6)$$

или в безразмерном виде:

$$\int_0^1 W r dr = \frac{1}{2}. \quad (7)$$

В результате решения данных уравнений конечно - разностным методом (методом прогонки) получаем распределение температур и скоростей, а также кривую гидравлического уклона вдоль трассы трубопровода в каждый момент времени.

Блок-схема моделирования нестационарного режима работы на слое  $t$  при ламинарном режиме течения представлена на рисунке 3.

Рисунок 3 – Блок-схема моделирования нестационарного режима на слое  $t$

Описание алгоритма:

Шаг 1. Задание исходных данных: температуры закачки и производительности трубопровода при пуске.

Шаг 2. Решение уравнения энергии (1) с граничными условиями (2) на слое  $j = \overline{1, N_z, 1}$ , подставляя в него найденное из уравнения движения распределение скоростей на слое  $j-1$  (на нулевом шаге по длине принимается температура закачки). Нахождение распределения температур  $T_{ij}, i = 1..N_R$ .

Шаг 3. Решение уравнения движения (3) с граничными условиями (4), (5) на слое  $j = \overline{0, N_z, 1}$ . Нахождение такого распределения скоростей  $W_{ij}, i = 1..N_R$ , которое обеспечит выполнение условия постоянства расхода (7) путем варьирования в уравнении движения потерями напора на трение  $\frac{\partial P}{\partial z}$  на слое  $j$ .

Шаг 4. Если  $j \leq N_z$ , то переход к шагу 2, иначе переход к шагу 5.

Шаг 5. Подбор средней скорости течения нефти, такой, чтобы сумма потерь не превосходила некоторой заданной величины  $Dp_{MAX}$ . Если сумма потерь на трение меньше  $Dp_{MAX}$ , то увеличиваем среднюю скорость (при условии, что расход при этом получится не больше заданного, иначе остановиться). Если сумма потерь на трение больше  $Dp_{MAX}$ , то уменьшаем среднюю скорость (если она становится равной нулю, то пуск при заданном суммарном давлении невозможен).

Шаг 6. Переход к следующему временному шагу.

Разработанная методика по моделированию режимов работы нефтепровода реализована в программном комплексе NIPAL (Non-Isothermal Pipeline for Abnormal Liquids). В программный комплекс NIPAL входят следующие блоки:

- 1) подпрограмма по идентификации характеристик участков трубопроводов и характеристик насосно-силового оборудования;
- 2) подпрограмма «Подбор модели» по выбору оптимальной реологической модели течения нефти по двум параметрам (погрешности и риску);

3) подпрограмма NIPAL по моделированию следующих режимов работы трубопровода:

- стационарного режима;
- режима остановки (остывания) трубопровода;
- пускового режима;
- переходных режимов (смены режимов работы без остановки);

4) программа ведения баз данных, функционирующая независимо от программного комплекса.

Трубопровод может состоять из любого количества участков, которые идентифицируются по следующим параметрам:

1) способу укладки труб:

- подземный участок трубопровода;
- надземный участок;
- подводные участки в стоячей или проточной воде;

2) диаметру трубопровода (может изменяться по длине);

3) производительности трубопровода (возможно моделирование трубопровода с подкачкой);

4) реологическим свойствам жидкости;

5) тепловой изоляции;

6) системам попутного электроподогрева (на различных участках и при различных режимах работы).

Наиболее значимые результаты моделирования режимов работы нефтепровода:

1) кривая распределения давления вдоль трассы трубопровода (в атмосферах или МПа) в любой момент времени;

2) распределение средней и среднескоростной (реальной) температур вдоль трассы трубопровода;

3) получение двумерного распределения температур и скоростей (по радиусу и длине) в виде матриц и/или цветовых схем в заданный момент времени;



- 4) истинное давление на внутреннюю стенку трубы с учетом профиля трассы для всех режимов работы участка нефтепровода;
- 5) «P-Q» характеристики трубопровода (для стационарного режима работы и при заданном времени с начала пуска).

Расчеты продемонстрировали высокую точность методики и программного комплекса NIPAL (погрешность порядка 10 %).

С помощью программного комплекса NIPAL имеется возможность оценить дискретную зависимость пропускной способности участков трубопровода от затрат, вложенных в каждую из технологий.

**В третьей главе** на основе результатов проведенного математического моделирования режимов работы трубопровода проводятся постановка, формализация и реализация оптимизационной задачи с экономическими критериями, а также применение методики для увеличения пропускной способности нефтепровода Уса – Ухта (Республика Коми).

На каждом участке трубопровода методом наименьших квадратов определяются функциональные зависимости пропускной способности трубопровода от затрат на применение каждой из технологий. В качестве аппроксимирующих функций приняты непрерывные, возрастающие и ограниченные функции вида

$$Q(C_{i,j}) = B_{i,j} \frac{2}{\pi} \arctg(K_{i,j} C_{i,j}) + A_{i,j}; \quad i = 1..n; \quad j = 1..m, \quad (8)$$

где  $n$  - количество участков трубопровода,  $m$  - число возможных технологий, масштабирующий коэффициент  $K_{i,j}$  определяет степень растяжения (сжатия) кривой относительно оси абсцисс (затрат),  $A_{i,j}$  – минимальное значение производительности участка, млн т/год,  $B_{i,j}$  – амплитуда изменения функции (максимальный объем перекачки минус минимальный),  $\frac{2}{\pi}$  - нормировочный множитель.

Для нахождения матрицы коэффициентов  $K_{i,j}$  определяется дискретная зависимость производительности участка от затрат на применение той или

иной технологии. Эти затраты должны быть такими, чтобы условия перекачки удовлетворяли нормативным и регламентным параметрам, установленным для данного трубопровода:

- пусковое давление не должно превышать максимального давления, развиваемого насосно-силовым оборудованием;
- должна быть обеспечена безопасная остановка трубопровода на время не менее 72 часов (на случай аварийной остановки трубопровода);
- должна быть обеспечена производительность трубопровода не ниже заданной;
- должен быть допустимый по технологическим параметрам температурный режим перекачки.

Необходимо определять пусковое и стационарное давления, температуру перекачки, время безопасной остановки, зная свойства нефти и условия перекачки. Данная задача решается с помощью программного комплекса NIPAL.

После определения функциональных зависимостей (8) переходим к решению следующей задачи математического программирования: необходимо выбрать технологию для транспорта нефти и определить затраты на ее применение на каждом из участков трубопровода, чтобы обеспечить максимальную прибыль при условии, что объем перекачки должен быть не ниже заданного. При этом прибыль от применения технологии  $j = \overline{1..m}$  на участке  $i = \overline{1..n}$  определяется как разность между доходом и затратами при прочих равных условиях. Пример аппроксимационной модели для участка «Уса-Сыня» при применении технологии 1 (введение депрессорной присадки), а также зависимость прибыли от затрат показаны на рисунке 4. По левой шкале отложена аппроксимационная модель зависимости производительности участка от затрат на применение технологии 1 (с экспериментальными точками), а также границы изменения производительности  $Q_{\min}$  и  $Q_{\max}$ . По правой шкале отложена зависимость прибыли от затрат.

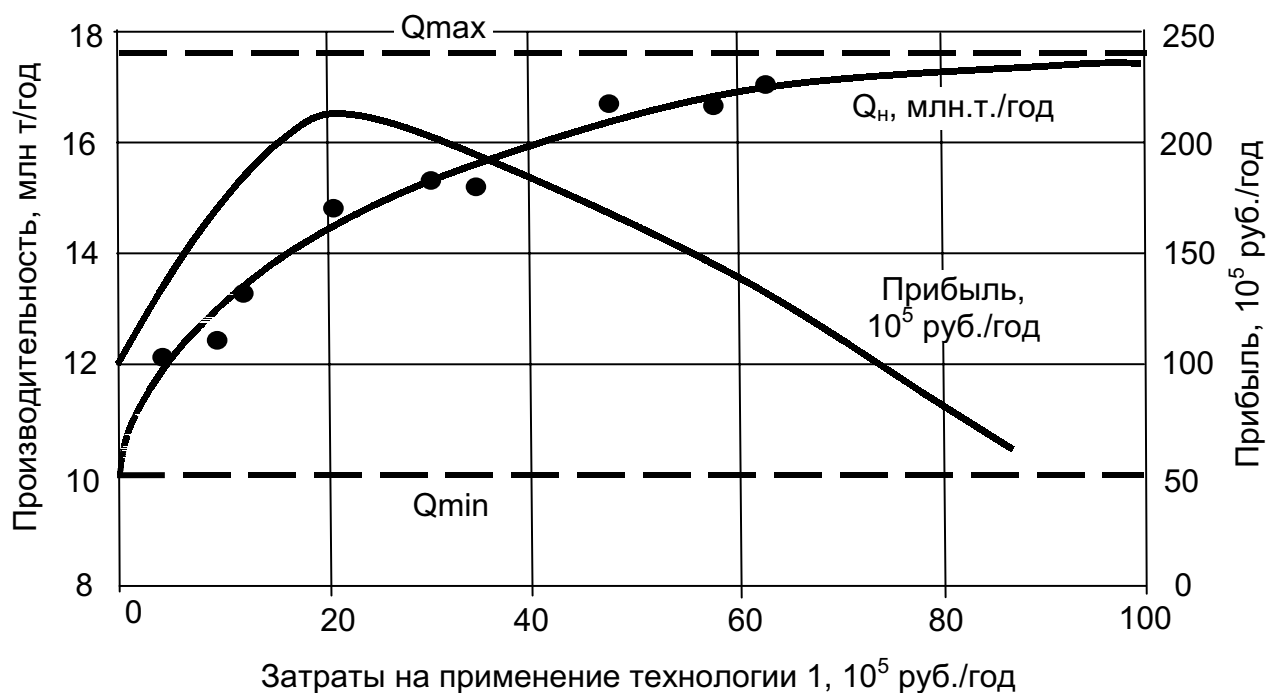


Рисунок 4 - Кривая зависимости производительности участка «Уса-Сыня» от затрат на технологию 1.

Предложено целевую функцию определить в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Pi(C_{i,j}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (L_i \cdot T \cdot Q(C_{i,j}) - C_{i,j}) \rightarrow \max, \quad (9)$$

где  $Q(C_{i,j}) = B_{i,j} \frac{2}{\pi} \arctg(k_{i,j} C_{i,j}) + A_{i,j}$ ,  $i = 1..n$ ,  $j = 1..m$ .

Ограничения:

$$\begin{aligned} Q \min_i &\leq Q(C_{i,j}) \leq Q \max_i \quad i = 1..n, \quad j = 1..m; \\ Q(C_{i,j}) &= B_{i,j} \frac{2}{\pi} \arctg(k_{i,j} C_{i,j}) + A_{i,j}, \quad i = 1..n, \quad j = 1..m. \end{aligned} \quad (10)$$

Так как на участке можно выбрать только одну из  $m$  технологий, то очевидно, что необходимо ввести дополнительные ограничения. Для этого в задачу включается  $\delta$  - матрица, имеющая размерность матрицы стоимостей и состоящая из бинарных элементов. При этом  $\delta_{i,j} = 1$ , если на участке  $i$  применяется технология  $j$ , и  $\delta_{i,j} = 0$  в противном случае. Эти условия достигаются с помощью следующих ограничений, наложенных на  $\delta$  - матрицу:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{k=j+1}^m \delta_{i,j} \delta_{i,k} &= 0, \quad i = 1..n \\ \sum_{j=1}^m \delta_{i,j} &= 1, \quad i = 1..n \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом вышеизложенного целевая функция преобразуется к виду

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \delta_{i,j} \Pi(C_{i,j}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \delta_{i,j} (L_i \cdot T \cdot Q(C_{i,j}) - C_{i,j}) \rightarrow \max, \quad (12)$$

где  $Q(C_{i,j}) = B_{i,j} \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg}(k_{i,j} C_{i,j}) + A_{i,j} \quad i = 1..n, \quad j = 1..m$

Система ограничений включает в себя технологические ограничения и ограничения на  $\delta$  - матрицу.

Исходными данными являются также минимальная и максимальная пропускные способности на каждом из участков.

Таким образом, алгоритм формализации и решения задачи математического программирования по поиску оптимальных технологий и объемов их применения на каждом из участков выглядит следующим образом:

- 1) с помощью программного комплекса NIPAL получаем дискретные зависимости производительностей каждого из участков от затрат на применение технологий. Полученные дискретные зависимости аппроксимируются функциями вида (8);
- 2) аппроксимация полученных дискретных зависимостей сводится к решению  $m \times n$  нелинейных уравнений, которые решаются методом дихотомии. В результате получаем матрицу масштабирующих коэффициентов  $K_{i,j}$ ,  $i = 1..n; j = 1..m$ ;
- 3) после определения всех функций вида  $Q(C_{i,j})$ ,  $i = 1..n; j = 1..m$  решается задача математического программирования по поиску оптимальных технологий и объемов их применения на каждом из участков.

После решения поставленной задачи появляется возможность выбора технологий и оптимальных размеров инвестиций на применение этих технологий на каждом участке таким образом, чтобы суммарная прибыль на всех участках была максимальной.

Применение предлагаемой методики позволило предприятию оптимизировать затраты на перекачку геологически сложной нефти, обеспечить необходимые объемы перекачки для удовлетворения нужд

заказчиков, гибко использовать тарифную политику, обеспечить безопасную работу трубопровода путем выбора режимов его работы.

С помощью методик, представленных в работе, сокращаются затраты на транспорт реологически сложной нефти и, как следствие, снижается себестоимость перекачки и увеличивается прибыль предприятия.

### **Выводы**

1. Выбор оптимальной комбинации технологических приемов перекачки реологически сложных нефтей предложено производить на основе моделирования процессов тепло- и массопереноса в двумерной постановке (по радиусу и длине трубопровода).
2. Разработаны математические модели следующих режимов эксплуатации неизотермического трубопровода: стационарного, пускового, остановки, переходных режимов, связанных с изменением параметров перекачки без остановки. Учтены такие режимы течения нефти, как ламинарный с «застойными зонами», турбулентный, структурный.
3. Разработан и зарегистрирован программный комплекс NIPAL, предназначенный для моделирования режимов эксплуатации неизотермического нефтепровода, который прошел апробацию на действующем нефтепроводе Кумколь-Каракоин Республики Казахстан. Результаты работы включены в РД 39-087-03 «Инструкция по технологии перекачки застывающих нефтей с депрессорными присадками».
4. Разработана методика оптимизации технологических приемов перекачки реологически сложных нефтей с целью максимизации прибыли предприятия, основанная на выборе оптимальных технологий перекачки и объемов их применения в стоимостном выражении. Экономический эффект от внедрения методики составляет 13,8 % по сравнению с применением традиционных технологий (на объектах ОАО «Северные МН»).

**Публикации по теме диссертации:**

1. Штукатуров К.Ю., Шутов А.А., Назаренко В.Н. Подбор аппроксимационной модели реологического поведения высокопарафинистых нефтей с месторождений Восточного Казахстана // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов: Сб. научн. тр. / ИПТЭР. - Уфа: ТРАНСТЭК, 2001. – Вып. 60. – С.18 – 25.
2. Гумеров А.Г., Пирогов А.Г., Шутов А.А., Штукатуров К.Ю. Моделирование режимов работы неизотермического трубопровода с использованием программного комплекса NIPAL // Перспективы развития трубопроводного транспорта России. Тез. докл. конф. 22 мая 2002 г. – Уфа, 2002. – С. 3-4.
3. Стрижков В.Н., Федоров В.Т., Дьячук А.И., Топтыгин С.П., Шутов А.А., Штукатуров К.Ю. Исследование проблем транспорта нефтей по магистральному нефтепроводу «Уса-Ухта» // Перспективы развития трубопроводного транспорта России. Тез. докл. конф. 22 мая 2002 г. – Уфа, 2002. – С. 7-8.
4. Бахтизин Р.Н., Шутов А.А., Штукатуров К.Ю. Реологические модели нефтей Кумкольского и Акшибулакского месторождений // Трубопроводный транспорт – сегодня и завтра. Матер. Междун. научно-техн. конф. - Уфа: Монография, 2002.– С. 90-92.
5. Штукатуров К.Ю., Шутов А.А., Назаренко В.Н. Пусковые режимы участков неизотермического нефтепровода, работающего в осложненных условиях // Трубопроводный транспорт – сегодня и завтра. Матер. Междун. научно-техн. конф. - Уфа: Монография, 2002.– С. 72-74.
6. Гумеров А.Г., Журавлев Г.В., Шутов А.А., Штукатуров К.Ю., Шайхисламов А.С., Назаренко В.Н. Инструкция по технологии перекачки застывающих нефтей с депрессорными присадками. РД 39-087-03. – Астана, 2003. – 99 с.
7. Бахтизин Р.Н., Шутов А.А., Штукатуров К.Ю. Оптимальный выбор технологий для работы неизотермического трубопровода // Башкирский химический журнал. – 2003. – Т. 10. - № 1.- С. 18-20.
8. Штукатуров К.Ю. Повышение экономической эффективности работы неизотермического нефтепровода // Управление экономикой: методы,

модели, технологии. Матер. Российской научн.-метод. конф. с междунаучным участием. Ноябрь 2002 г. – Уфа, 2002. – С. 242.

9. Штукатуров К.Ю. Повышение экономической эффективности работы неизотермического нефтепровода // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов: Сб. научн. тр. / ИПТЭР. - Уфа: ТРАНСТЭК, 2002. – Вып. 61. – С. 121 – 125.
10. Бахтизин Р.Н., Шутов А.А., Штукатуров К.Ю. Повышение экономической эффективности работы неизотермического нефтепровода // Интеграция науки и высшего образования в области био- и органической химии и механики многофазных систем. Матер. I Всероссийской научн. Internet-конф. 25-27 декабря 2002 г. – Уфа, 2002. - С. 71-72.
11. Бахтизин Р.Н., Шутов А.А., Штукатуров К.Ю. Методика повышения эффективности энергосбережения при перекачке высоковязкой нефти // Материалы IV конгресса нефтегазопромышленников России 20-23 мая 2003 г., секция «Энергоэффективные технологии». Тез. докл. - Уфа: ТРАНСТЭК, 2003. – С. 50-52.
12. Штукатуров К.Ю., Шайхисламов А.С. Методика повышения энергосбережения при работе неизотермического трубопровода, оборудованного саморегулирующимися системами попутного электроподогрева // Материалы IV конгресса нефтегазопромышленников России 20-23 мая 2003 г., секция «Энергоэффективные технологии». Тез. докл. - Уфа: ТРАНСТЭК, 2003. – С. 74-76.
13. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2003611947. Моделирование режимов работы неизотермического нефтепровода / А.Г. Гумеров, А.А. Шутов, К.Ю. Штукатуров - М.: Роспатент, 2003.
14. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2003612015. ППП «Энергопотребление» / Р.Н. Бахтизин, М.А. Валиев, Д.В. Кулаков, С.Е. Кутуков, К.Ю. Штукатуров, Ю.Л. Эйзенкрейн - М.: Роспатент, 2003.
15. Штукатуров К.Ю. Применение пакета Mathcad 11 для математического моделирования режимов работы трубопровода, перекачивающего высоковязкие нефти // ExponentaPRO. — 2004. – № 1. — С. 54–60.