

На правах рукописи



**БУЧИНСКИЙ СТАНИСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ  
ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ С УЧЕТОМ  
КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОМЫСЛОВЫХ  
ТРУБОПРОВОДОВ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Тюмень 2009**

Работа выполнена на кафедре «Механики многофазных систем»  
ГОУ ВПО «Тюменский Государственный Университет»

**Научный руководитель:**

Доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки России  
**Александр Борисович Шабаров**

**Официальные оппоненты:**

Доктор технических наук, профессор (г. Тюмень)  
**Александр Анатольевич Захаров**

Доктор технических наук, профессор (г. Москва)  
**Алексей Георгиевич Чукаев**

**Ведущая организация:**

**ОАО «Гипротюменнефтегаз» (г. Тюмень)**

Защита состоится 19 июня 2009 года в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.274.10 при Тюменском Государственном Университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тюменский Государственный Университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Семакова, 18

Автореферат разослан 18 мая 2009 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-  
математических наук

А.С. Матаев

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Одной из наиболее важных проблем эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений в северных климатических условиях является выбор рациональных конструктивных и технологических решений с целью предотвращения гидратообразования, нарушающего стабильность внутрипромыслового сбора продукции скважин. Затраты на ингибиторы гидратообразования, чаще всего метанол, составляют значительную часть стоимости эксплуатации месторождения. Необходимо разрабатывать технологии снижения этих затрат путем создания интеллектуальных систем управления добычей и сбором продукции скважин использующих методы компьютерного моделирования. Анализ осложнений при работе систем сборных шлейфов газового месторождения и разработка мероприятий по предотвращению этих осложнений должны опираться на модели тепломассопереноса в многофазных средах, описывающие процессы, происходящие при сборе скважинной продукции и транспортировке ее до установок комплексной подготовки газа (УКПГ).

Существующие и используемые на практике модели гидратообразования, как правило, не учитывают многообразие конструктивных особенностей промысловых газопроводов и особенности передачи тепла от газа в окружающую среду в реальных конструкциях при переходах трубопровода через автодороги, реки, заболоченные участки и не обеспечивают минимизацию себестоимости добычи газа на промыслах.

Актуальной задачей является разработка методов и инженерных решений для обеспечения рационального управления тепловыми режимами гидратообразования с учетом реальных конструктивных особенностей внутрипромысловых трубопроводов.

**Цель работы:** Разработка метода управления тепловыми режимами в различных конструкциях промысловых газопроводов, обеспечивающего безгидратный сбор газа и конденсата с уменьшением эксплуатационных затрат.

Исходя из поставленной цели, определены и решены следующие задачи научного исследования:

1. Разработка физико-математической модели течения и тепломассообмена многокомпонентной среды при наличии защитных кожухов, теплоизоляции и метанолпровода, проложенного в одной траншее с газопроводом.
2. Исследование процессов образования и диссоциации газогидратов с учетом влияния теплообмена с окружающей средой и метанолпроводом с использованием компьютерной программы выполненной на основе разработанной модели.

3. Разработка рекомендаций по применению метода управления тепловыми процессами и изучение закономерностей безгидратного сбора газа на примере условий Берегового газоконденсатного месторождения.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработана квазиодномерная модель течения и тепломассообмена многокомпонентной среды – природный газ, газоконденсат, пары воды, влага, газогидраты и метанол при граничных условиях тепломассообмена, свойственных различным, применяемым на практике, конструкциям прокладки промысловых газопроводов.
2. Выявлено влияние конструктивных особенностей прокладки газопроводов на интенсивность образования и разложения гидратов при различном составе многокомпонентной среды и различных параметрах продукции скважин, метанола и окружающей среды.
3. Предложен и обоснован метод управления безгидратным сбором газа путем регулирования расхода и температуры горячего теплоносителя в специальном трубопроводе, расположенном в общей с газопроводом теплоизолирующей оболочке, или внутри газопровода.
4. Установлено, что для обеспечения безгидратного режима сбора газа в северных климатических условиях в горячий трубопровод достаточно подавать воду или теплоноситель с пониженной температурой замерзания при температуре 310 – 330 К, разработаны методика и алгоритм оптимизации расхода горячего теплоносителя.

**Практическая ценность работы:**

1. Разработанная теплофизическая модель реализована в виде компьютерной программы, применимой для вариантных инженерных расчетов на стадии проектирования и эксплуатации газопроводов.
2. Показана возможность существенного снижения расхода метанола за счет получения расчетной информации об условиях гидратообразования на различных участках промысловых газопроводов.
3. Установлена эффективность использования дополнительных трубопроводов с горячим теплоносителем при сборе природного газа.
4. Результаты работы использованы при определении тепловых режимов газопроводов Берегового месторождения в Ямало-Ненецком автономном округе.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается использованием основных базовых законов термогазодинамики многофазных сред, наиболее достоверных обобщенных экспериментальных данных, применением современного математического аппарата, основанного на методе контрольного объема, специальными исследованиями погрешности численного метода при различных размерах контрольных объемов, а также сопоставлением полученных численных решений с известными опубликованными данными для случаев подземной прокладки изолированных трубопроводов.

### **Апробация работы:**

Основные результаты работы были доложены и обсуждены на конференциях молодых специалистов и ученых ОАО «Лукойл», посвященных промысловым проблемам разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений (Тюмень, 2005 – 2006 г.), на 19-й Школе-семинаре молодых ученых и специалистов «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» под руководством академика РАН А.И.Леонтьева (Калуга, 2005г.), на 4-й и 5-й Школе-семинаре молодых ученых и специалистов «Теплофизика, гидродинамика, теплотехника» под руководством Заслуженного деятеля науки России, д.т.н., профессора А.Б. Шабарова (Тюмень, 2007 – 2008 г.), на семинарах кафедры «Механики многофазных систем», ТГУ (2004 – 2008г.), на рабочих семинарах ООО «КогалымНИПИнефть» (2006 – 2007г.), ОАО «Сибнефтегаз» и на рабочих совещаниях ведущей организации ОАО «Гипротюменнефтегаз» (2008 – 2009 г.).

### **Научные публикации:**

По теме диссертационной работы опубликовано 5 печатных работ: 3 статьи, одна из которых в журнале по перечню ВАК; 2 отдельных научных издания, общим объемом 50 страниц.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 122 страницы, в том числе 50 рисунков, 6 таблиц и 8 приложений. Список литературы состоит из 108 наименований.

## **Краткое содержание работы**

**Во введении** показана актуальность работы, формулируется цель, научная новизна и кратко излагается структура диссертационной работы.

**В первом разделе** приводится общее описание характерных объектов исследования, обсуждается проблема гидратообразования в газопроводах и анализируются результаты существующих исследований в области термодинамики гидратообразования и методов его предотвращения, а также исследований процессов массопереноса в многофазных средах, выполненные различными отечественными и зарубежными учеными, среди которых работы Алтунина А.Е., Бондарева Э.А., Бухгалтера Э.Б., Габышевой Л.Н., Гармаш В.Б., Истомина В.А., Константиновой И.М., Лурье М.В., Макогона Ю.Ф., Мусаева Р.М., Мусакаева Н.Г., Саркисянца Г.А., Сыртланова В.Р., Уразова Р.Р., Шагапова В.Ш., Якушева В.С., а также иностранных ученых: Carroll J.J, Frost E.M., Gudmundsson J.S., Levik O.I и других.

Проведенный аналитический обзор опубликованных данных по проблемам гидратообразования в промысловых газопроводах позволяет сделать следующие выводы:

1. Образование газовых гидратов в промысловых трубопроводах систем сбора газа является распространенным технологическим осложнением, в особенности характерным для зимних условий эксплуатации северных газовых и газоконденсатных месторождений. Предотвращение этих осложнений при сниженных эксплуатационных затратах является актуальной научно-технической и производственной проблемой;

2. Термобарические условия образования и диссоциации газогидратов достаточно подробно изучены в условиях статического термодинамического эксперимента. Предложены различные модельные механизмы гидратообразования, изучены скорости роста гидратов при различных условиях, получены эмпирические зависимости для расчета газогидратного слоя на твердой поверхности, выявлены факторы, влияющие на скорость гидратообразования;

3. В качестве ингибитора гидратообразования наиболее часто используется раствор, содержащий 90% метанола. Разработана и применяется на практике методика расчета параметров гидратообразования при использовании ингибиторов сложного состава, интенсивно развиваются методы оптимизации состава таких ингибиторов.

4. Разработаны методы расчета изменения температуры и давления при движении газа, жидкости и газожидкостных смесей в трубопроводах, а также скорости роста гидратов. Основную трудность при моделировании реальных процессов гидратообразования представляет собой учет специфических граничных условий теплопередачи и массообмена при росте и разложении гидратов в многокомпонентных средах: природный газ, конденсат, пары воды, влага, метанол с учетом фазовых переходов для различных конструкций прокладки трубопроводов и метанолпроводов в одной конструкции, использование защитных кожухов, футляров и т.д.

5. Необходим учет влияния различных конструктивных особенностей газо- и метанолпроводов на теплообмен в пределах отдельных шлейфов, проходящих через дороги, русла рек, заболоченные участки месторождений с вечномерзлыми грунтами различной влажности и льдистости.

6. Необходима разработка и исследование методов предотвращения гидратообразования за счет различных, в частности тепловых, методов воздействия на поток скважинной продукции в промышленном трубопроводе.

**Во втором разделе** рассматривается исходная расчетная модель течения газожидкостной смеси (природный газ, газоконденсат, пары воды, вода и метанол) с учетом фазового перехода «газ и вода - газогидрат». Предполагается, что газогидраты могут образовываться или разлагаться на внутренней поверхности газопровода.

В разделе 2.1 выполнена физико-техническая постановка задачи. Дается описание метода «контрольного объема» (КО) применительно к рассматриваемой квазиодномерной задаче. Производится приведение основных типов прокладки и конструкции трубопроводов на месторождении к трем основным расчетным типам конструкций: 1. – Конструкция, предусматривающая прокладку газопровода в защитном кожухе совместно с метанолпроводом, 2. – Конструкция, предусматривающая прокладку газопровода совместно с метанолпроводом в теплоизоляции, 3. – Конструкция, предусматривающая прокладку газопровода совместно с метанолпроводом в одной траншее без теплоизоляции.

В разделе 2.2 приведены основные допущения, принятые при решении задачи. На основе предварительных расчетов обоснована возможность рассмотрения решения в квазистационарной постановке. Ввиду того, что расход природного газа гораздо больше расходов остальных компонент, среду полагаем однотемпературной, с общим давлением и равными скоростями компонент. В расчетную систему уравнений для сечения 2 контрольного объема  $x_2 = x_1 + \Delta x$  включены следующие группы соотношений:

Уравнения расхода отдельных компонент:

$$\begin{aligned} G_{g2} &= G_{g1} - \Delta G_{gc} + \Delta G_{mg} - \Delta G_{gh}, \\ G_{c2} &= G_{c1} + \Delta G_{gc}, \\ G_{p2} &= G_{p1} - \Delta G_{pw}, \\ G_{w2} &= G_{w1} + \Delta G_{pw} - \Delta G_{wh}, \\ G_{m2} &= G_{m1} - \Delta G_{mg}, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\Delta G_{gc}$  и  $\Delta G_{gh}$  – изменение расходов газа при переходе газа в конденсат и газогидрат,  $\Delta G_{pw}$  и  $\Delta G_{wh}$  – изменение расходов воды при переходе в пар и газогидрат,  $\Delta G_{mg}$  – изменение расхода метанола, связанное с испарением.  $G_i = \rho_i v_i S$  ( $i=g, c, p, w, m$ ) – массовые расходы отдельных компонент.

Уравнение импульсов в форме обобщенного уравнения Бернулли без учета работы сил инерции и межфазового взаимодействия:

$$P_2 = P_1 + \rho_{cp} \cdot \left( \alpha_{K1} \frac{v_1^2}{2} - \alpha_{K2} \frac{v_2^2}{2} + g(z_2 - z_1) - l_{mp} + l' \right), \quad (2)$$

где  $\alpha_{K1}, \alpha_{K2}$  – коэффициенты Кориолиса;  $z_1, z_2$  – высотные положения трубопровода;  $l_{mp}, l'$  – удельная работа сил трения и работа сил, связанных с подводом или отводом массы;  $v_1, v_2$  – осредненные скорости в сечениях 1 и 2.

Уравнение баланса внутренней энергии с учетом свойства аддитивности и нормировки при фазовых переходах приведенное к форме:

$$T_2 = T_1 + \Delta T_{внеш} + \Delta T_{дис} + \Delta T' + \Delta T_R, \quad (3)$$

где  $\Delta T_{внеш}, \Delta T_{дис}, \Delta T', \Delta T_R$  – составляющие изменения температуры в пределах контрольного объема, вызванные соответственно внешним теплообменом с окружающей средой, работой сил вязкости, работой сил при внешнем массообмене и эффектом Джоуля-Томпсона.

Уравнения состояния газовых компонент определяют истинные плотности газа и паров воды:

$$\rho_{g2}^{(0)} = \frac{P_2}{z_g(P_2, T_2) R_g T_2}, \rho_{p2}^{(0)} = \frac{P_2}{z_p(P_2, T_2) R_p T_2}. \quad (4)$$

Истинные плотности конденсата, воды и метанола  $\rho_c^{(0)}, \rho_w^{(0)}$  и  $\rho_m^{(0)}$  считаются постоянными.

Изменение расходов газа, перешедшего в конденсат, сконденсированных паров воды и растворившегося метанола определяется с учетом уравнения состояния насыщенного пара и известных равновесных кривых выпадения конденсата  $\rho_c = \rho_c(P, T, \rho_{c0})$  и испарения метанола в потоке газа  $\rho_m = \rho_m(P, T, \rho_{m0})$ :

$$\begin{aligned} \Delta G_{gc} &= \rho_{c2} S_2 v_2 - \rho_{c1} S_1 v_1, \\ \Delta G_{pw} &= \rho_{p1} S_1 v_1 - \rho_{p2} S_2 v_2, \\ \Delta G_{mg} &= \rho_{m1} S_1 v_1 - \rho_{m2} S_2 v_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\rho_{p2} = \frac{P_{p2S}(T_2)}{z_p R_p T_2}$ ,  $P_{p2S}(T_2) = P_w^* \exp\left(-\frac{T_w^*}{T_2}\right)$ ;

В разделе 2.3 описываются замыкающие соотношения для расчета параметров гидратообразования. Равновесная температура образования и



разложения гидратов вычисляется по известным обобщенным опытным данным:

$$T_S(P) = T_{S0} + T_p \cdot \ln\left(\frac{P}{P_{S0}}\right) - \Delta T_m, \quad (6)$$

где  $\Delta T_m = T_{m0} \frac{G_{m2}}{G_{w2} + G_{m2}}$  – поправка, учитывающая снижение равновесной температуры гидратообразования  $T_S$  при введении в поток метанола.

Условиями гидратообразования является  $T < T_S(P)$  и наличие в потоке влаги. Интенсивность гидратообразования в равновесных условиях определяется величиной удельной тепловой мощности  $q_h$ , выделяемой при образовании гидрата, которая определяется типом конструкции, температурами  $T$ ,  $T_{SR}$ , термическими сопротивлениями слоев  $R_k$ . Так, например, для типа конструкции 1 получена зависимость:

$$q_h = \frac{\pi \cdot (T - T_{SR}) - q_g R - q_V \sum_{k=4}^6 R_k}{\sum_{k=2}^N R_k}, \quad (7)$$

где  $q_g = \alpha_1 \pi d (T - T_S)$ , Вт/м – удельная мощность теплового потока между слоем газогидрата и газом,  $q_V$  – тепловая мощность объемных источников тепла (от нагретого водопровода, метанолпровода в одной траншее с газопроводом и т.п.),  $R = \sum_{k=1}^6 R_k$  – суммарные термические сопротивления слоев, ограничивающих газ в трубопроводе.

Особенности расчета теплопередачи в различных конструкциях приведены в разделе 2.4. Интенсивность гидратообразования определяется следующей зависимостью:

$$G'_h = \Delta G_{gh} + \Delta G_{wh} = \frac{q_h \Delta x}{l_S}, \quad k_{st} = \frac{\Delta G_{gh}}{\Delta G_{wh}}, \quad \Delta G_{gh} = \frac{k_{st}}{1 + k_{st}} G'_h, \quad (8)$$

где  $l_S$  – удельная теплота гидратообразования, соотношение  $\Delta G_{gh}$  и  $\Delta G_{wh}$  определяется стехиометрическим коэффициентом  $k_{st}$ . Аналогично, при наличии слоя газогидрата толщиной  $\delta_h$  и выполнением условия  $T > T_S(P)$  рассчитывается процесс разложения гидратов.

В разделе 2.5 приведена замкнутая система расчетных уравнений, основанная на уравнениях (1) – (8) и известных замыкающих соотношениях, построенных путем аппроксимации опытных данных. Приводится перечень параметров, задаваемых во входном сечении, а также геометрические характеристики рассматриваемых конструкций трубопроводов.

В разделе 2.6 рассмотрены особенности граничных условий теплопередачи в различных конструкциях трубопровода, где существенно различны тепловые потоки на границе «многокомпонентная среда - газогидрат» (при наличии слоя гидрата) и на границе «многокомпонентная среда – внутренняя поверхность трубопровода», а также характерны различные сочетания термических сопротивлений слоев: пристенного слоя многокомпонентной движущейся среды, слоя газового гидрата, стенки газопровода, слоя воздуха в кожухе, слоя теплоизоляции трубы, слоя при передаче тепла от внешней поверхности в окружающую среду. В подразделах 2.6.1, 2.6.2 и 2.6.3 приведена методика расчета тепловых потоков в различных конструкциях соответственно 1, 2 и 3 типа.

В разделе 2.7 рассматривается алгоритм и метод расчета, реализующие разработанную квазиодномерную модель тепломассообмена. Приводится блок-схема метода, на основании которого нами создана управляющая программа «Газогидрат».

Таким образом, расчет строится последовательно для контрольных объемов, начиная от сечения вблизи добывающей скважины, где задаются параметры газожидкостного потока, до входа трубопровода на узлы учета, сепарации или УКПГ. В начальный момент времени задается распределение вдоль трубопровода толщины слоя газогидрата  $\delta_h$ . Количество параметров и число расчетных соотношений совпадает. По известным параметрам в сечении  $x=x_1$  итерациями вычисляются расходы компонентов  $G_{g2}, G_{c2}, G_{p2}, G_{w2}, G_{m2}$  (1), статическое давление  $P_2$  (2), температура  $T_2$  (3), уточняются плотности газовых компонент  $\rho_{g2}^{(0)}, \rho_{p2}^{(0)}$  (4); находятся изменения расходов в пределах контрольных объемов  $\Delta G_{gh}, \Delta G_{wh}$  и  $G_h'$  (8), где удельная тепловая мощность  $q_h$  определяется по формуле (7). Средняя плотность смеси в сечении 2 вычисляется по формуле  $\rho_2 = \frac{G_2}{\sum_{i=1}^5 \frac{G_{2i}}{\rho_{2i}^{(0)}}}$ , где  $G_2 = \sum_{i=1}^5 G_i$ , приведенные плотности компонент

$\rho_{2i} = \rho_2 \frac{G_{2i}}{G_2}$ , средняя скорость смеси  $v_2 = \frac{G_2}{\rho_2 S_2}$ . Расчет повторяется до сходимости по расходам и температуре. Далее находится  $G_h'$  (8) и образовавшийся за время  $\Delta t$  слой гидрата:

$$\Delta \delta_h = \frac{G_h' \Delta t}{\pi d \rho_h}, \quad \delta_h^{(n+1)} = \delta_h^{(n)} + \Delta \delta_h. \quad (9)$$

Расчет проводится последовательно для всех выделенных контрольных объемов, с учетом особенностей вычисления  $q_h$  для различных конструкций в пределах данного газопровода. Далее расчет повторяется для последующих временных интервалов  $\Delta t$  при найденном

распределении на временном промежутке  $t^{(n)}$  толщин слоя газогидрата  $\delta_h^n(x)$ .

Выводы по 2 разделу работы можно сформулировать следующим образом:

1. Предложена и разработана односкоростная, однотемпературная модель течения многокомпонентной смеси с общим давлением фаз в промысловых газопроводах: природный газ, газоконденсат, пары воды, влага, метанол. Модель основана на уравнениях расхода для каждой фазы, обобщенном уравнении Бернулли для смеси, учитывающим массообмен между движущейся средой и слоем газогидрата, уравнении баланса энергии, сведенном к уравнению относительно температуры смеси, а также на замыкающих соотношениях. Расчетная модель приведена к системе алгебраических уравнений с применением метода контрольного объема.

2. Применительно к условиям шлейфов сбора продукции скважин газовых и газоконденсатных месторождений в равновесном приближении учтены, с использованием известных опытных данных, интенсивности фазовых переходов «влага и природный газ – газогидраты», «вода – пары воды», «метанол – природный газ», «природный газ - газоконденсат». При этом, равновесные параметры определяются термобарическими условиями, определяемыми с помощью разработанной квазиодномерной модели.

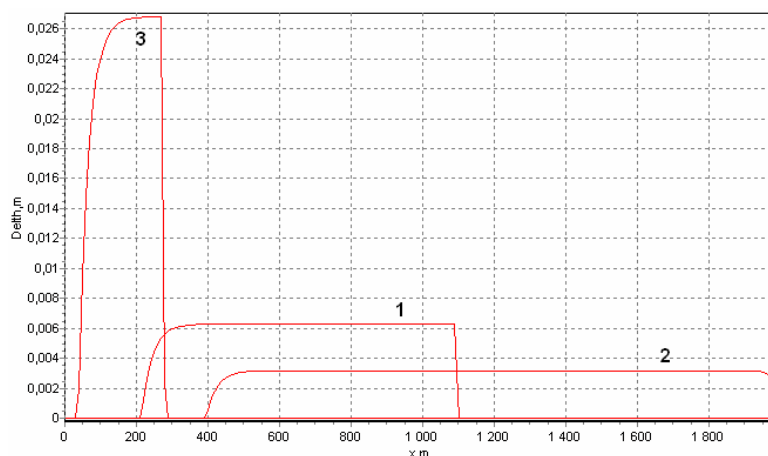
3. Разработанная модель учитывает конструктивные особенности трубопроводов – прокладку трубопровода в защитном кожухе, прокладку газопровода в одной траншее с метанолпроводом и пр. Для каждой из рассмотренных конструкций, характерной при прокладке в маловлажных грунтах, обводненных льдистых грунтах, на пойменных участках, сложенных льдистыми грунтами, а также на участках с сильнольдистыми грунтами, предложены расчетные схемы теплопередачи. Получены аналитические выражения для интенсивности образования и разложения газогидратов, найдены соотношения для расчета тепловых потоков и температур отдельных слоев с учетом термических сопротивлений для газопроводов, проложенных в защитном кожухе, в одной траншее с метанолпроводом при наличии общей теплоизоляции и без теплоизоляции.

4. На основе созданной модели тепломассообмена разработаны инженерный метод и соответствующий ему алгоритм, реализованные в виде компьютерной программы на языке Turbo Pascal, позволяющие проводить расчетно-параметрическое исследование процесса сбора продукции скважин и определять минимально необходимые расходы ингибитора для предупреждения гидратообразования в реальных условиях эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений.

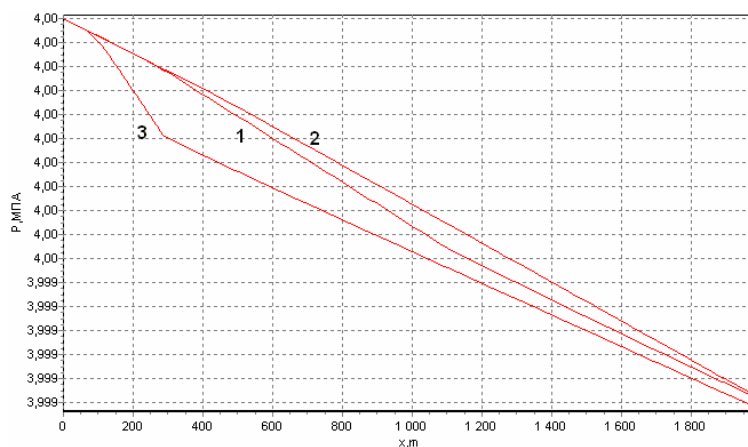
**В третьем разделе** приведены результаты расчетно-теоретического исследования процесса промышленного транспорта газа в различных вариантах конструкции трубопроводов, проведенного с использованием созданной компьютерной программы.

В разделе 3.1 проведено тестирование программы путем построения графических зависимостей распределения по длине трубопровода температуры, давления и толщины гидратной пробки. Сравнение полученных результатов с известными данными Уразова Р.Р. и Шагапова В.Ш. для простейших случаев подземной прокладки трубопровода подтверждают приемлемую точность разработанных нами модели и компьютерной программы.

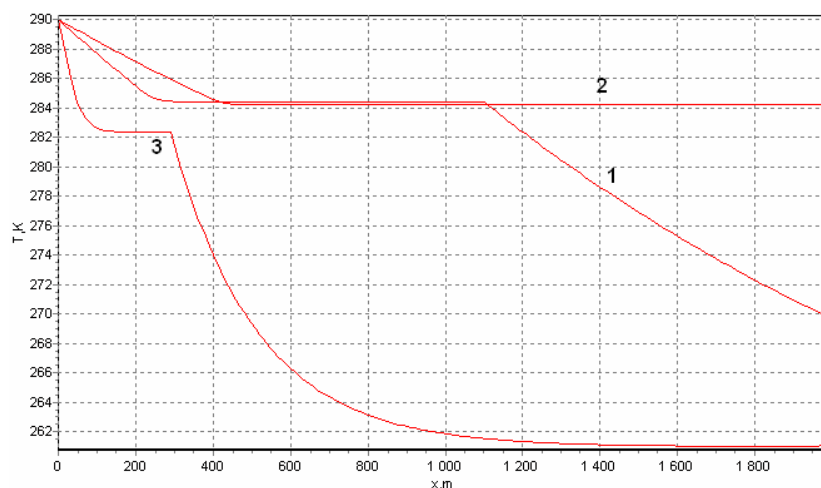
На рисунках 1 – 3 приведены распределения давления, температуры, и толщины гидратной пробки по длине трубопровода для трех реальных конструкций трубопроводов в момент времени 10 суток после начала образования гидратного слоя. На рисунке 4 приведена динамика роста гидратной пробки для различных конструкций.



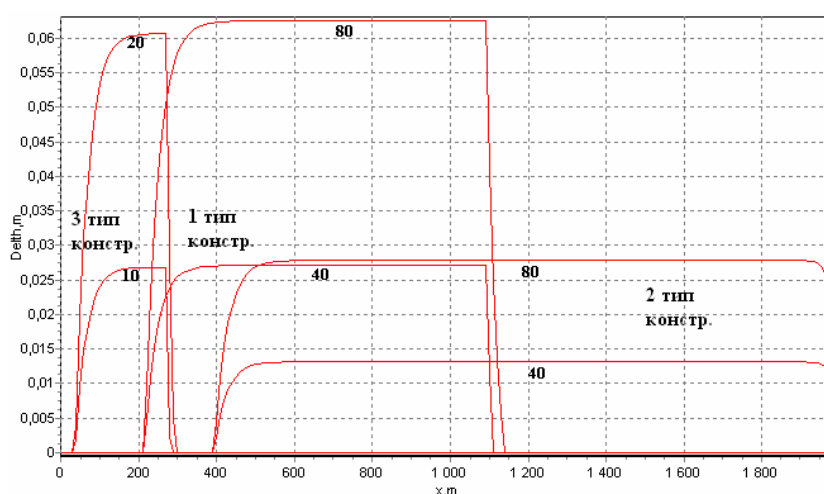
**Рис 1. Изменение толщины газогидратной пробки по длине трубы для разных типов конструкций, цифры над кривыми соответствуют типу конструкции.**



**Рис 2. Изменение давления по длине трубы для разных типов конструкций, цифры над кривыми соответствуют типу конструкции.**



**Рис 3. Изменение температуры по длине трубы для разных типов конструкций, цифры над кривыми соответствуют типу конструкции.**



**Рис 4. Динамика изменения толщины газогидратной пробки по длине трубы для разных типов конструкций, цифры над кривыми соответствуют времени гидратообразования, сут.**

По результатам проведенных исследований установлено, что быстрее всего растет гидратная пробка в конструкции 3 типа (труба в грунте совместно с метанолпроводом, проложенные без теплоизоляции), а для других конструкций толщина образовавшейся пробки значительно меньше, но по длине гидратная пробка более протяженная, как и зона гидратообразования. В конструкции 3 типа из-за увеличенных тепловых потоков в окружающую среду происходит более интенсивное гидратообразование и в потоке быстрее проявляется дефицит влаги.

В разделе 3.2. рассмотрено моделирование гидратообразования в реальном шлейфе Берегового газоконденсатного месторождения. При численных расчетах, на входе в промышленный трубопровод принимались следующие параметры газа:  $P_0=4.0$  МПа,  $T_0=290$  К,  $G_g=0.97$  кг/с ( $V_g=1.26$  м<sup>3</sup>/с),  $k_{w0}=4 \cdot 10^{-3}$ . В результате расчетов были получены распределения по длине трубопровода давления, температуры и толщины гидратной пробки (рис. 5-7), выявлены особенности теплообмена для конструкции 3

типа. Цифры на кривых соответствуют времени гидратообразования (в сутках).

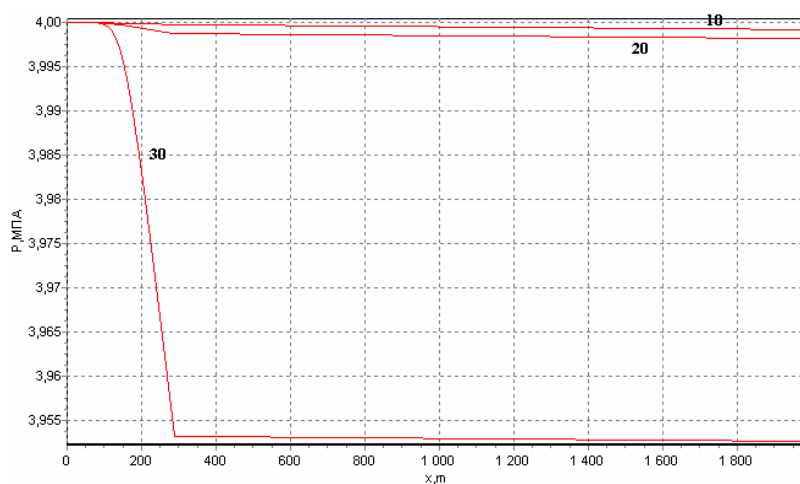


Рис. 5. Изменение давления по длине трубопровода Берегового ГКМ

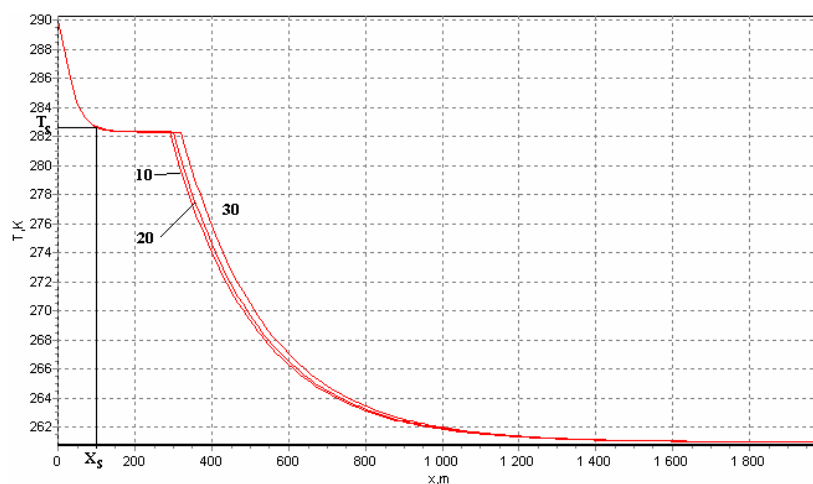


Рис. 6. Изменение температуры по длине трубопровода Берегового ГКМ

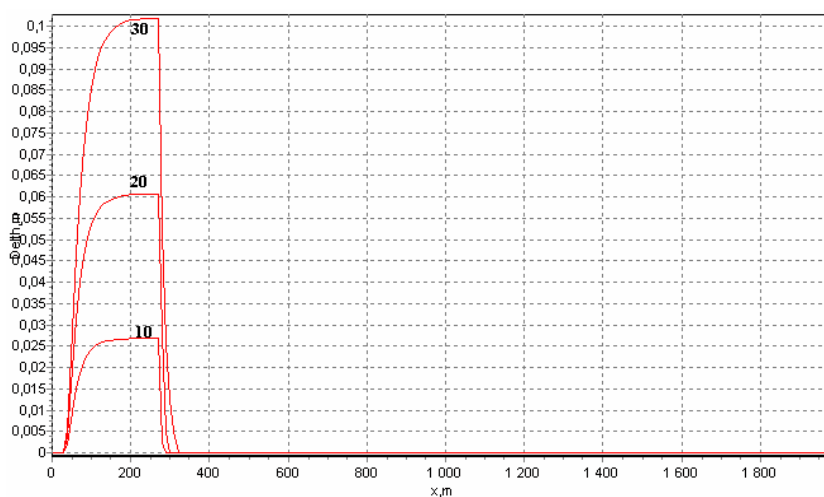


Рис. 7. Изменение толщины гидратной пробки по длине трубопровода Берегового ГКМ

В разделе 3.3 диссертационной работы рассмотрено изменение давления, температуры и толщины гидратной пробки при изменении входных параметров транспорта газа, а также при изменении температур грунта и окружающего воздуха.

Расчетно-теоретическое исследование промышленного сбора продукции скважин (с учетом течения многокомпонентной смеси: природный газ, газоконденсат, пары и капли воды, метанол), проведенное в третьем разделе диссертационной работы, позволило установить закономерности изменения термобарических условий, тепловых потоков и толщин газогидратных пробок по времени и длине трубопровода:

1. Увеличенные тепловые потоки в конструкции трубопровода в защитном кожухе без теплоизоляции приводят к появлению газогидратных пробок в сечениях более близких к устью скважины, чем в других конструкциях.

2. Объем газогидратов, выпадающих в различных конструкциях трубопроводов, практически совпадает, однако, наличие теплоизоляции в конструкции с прокладкой газопровода в одной траншее с метанолпроводом приводит к уменьшению скорости роста толщин гидратного слоя и росту протяженности этого слоя за счет уменьшения теплового потока при росте термических сопротивлений и, обычно незначительных, тепловых потоках от метанолпровода.

3. Основной причиной прекращения гидратообразования на участках, удаленных от устья скважины, для всех рассмотренных конструкций, является дефицит влаги в потоке, которая практически полностью переходит в газогидраты.

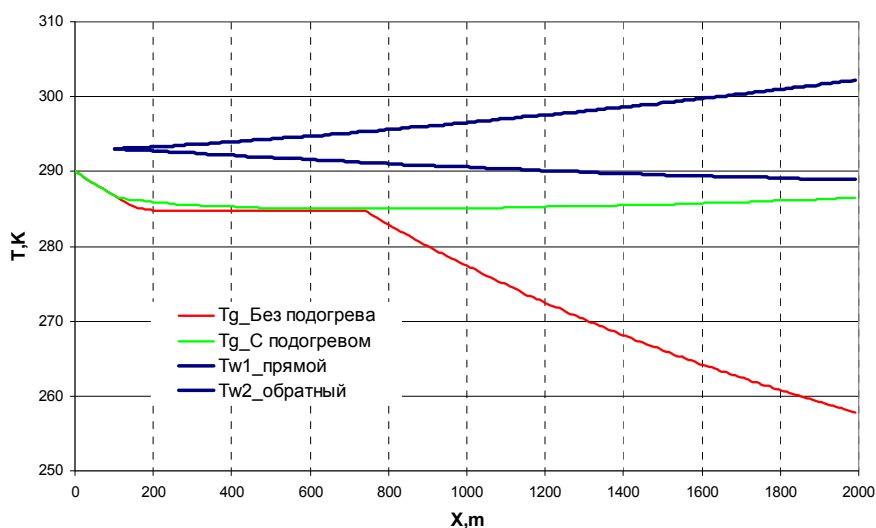
4. Характерные времена изменения параметров в трубопроводах за счет гидратообразования при постоянных параметрах и составе потока на устье скважин оцениваются величинами  $10^5 \div 10^6$  с., поэтому, как показали расчеты, при определении нестационарного процесса изменения слоя гидрата применима модель квазистационарного изменения давления и температуры многокомпонентной смеси в трубопроводе.

5. Все рассмотренные типы конструкций прокладки трубопровода при реальных параметрах, характерных, например, для Берегового месторождения, не обеспечивают безгидратный сбор продукции скважин без использования значительного расхода ингибиторов гидратообразования. Выявлена необходимость оптимизация расхода метанола, а также разработки тепловых методов обеспечения безгидратного сбора продукции скважин, чему посвящен раздел 4 данной работы.

**В четвертом разделе** с использованием компьютерной программы «Газогидрат», основанной на рассмотренной во втором разделе данной работы, многокомпонентной однотемпературной, односкоростной модели

гидратообразования с общим давлением фаз, произведены расчеты и выработаны конкретные рекомендации по осуществлению безгидратного сбора газа. Исследовано применение таких мероприятий как: оптимизация расхода метанола (раздел 4.1), электрообогрев трубопровода (раздел 4.2).

В разделе 4.3 рассмотрен принципиально новый способ теплового воздействия на промышленный газопровод, заключающийся в протяжке внутри или снаружи газопровода специальной закольцованной плети горячих трубопроводов с циркулирующей в них водой, либо теплоносителем с низкой температурой замерзания. Получены распределения основных параметров транспорта газа по длине трубопровода, а также распределение температуры в прямом и обратном греющих трубопроводах (рис.8). Даны рекомендации по определению оптимальных параметров такого вида подогрева.



**Рис.8. Распределение температур в газопроводе без подогрева, с подогревом и в трубопроводе подогрева.**

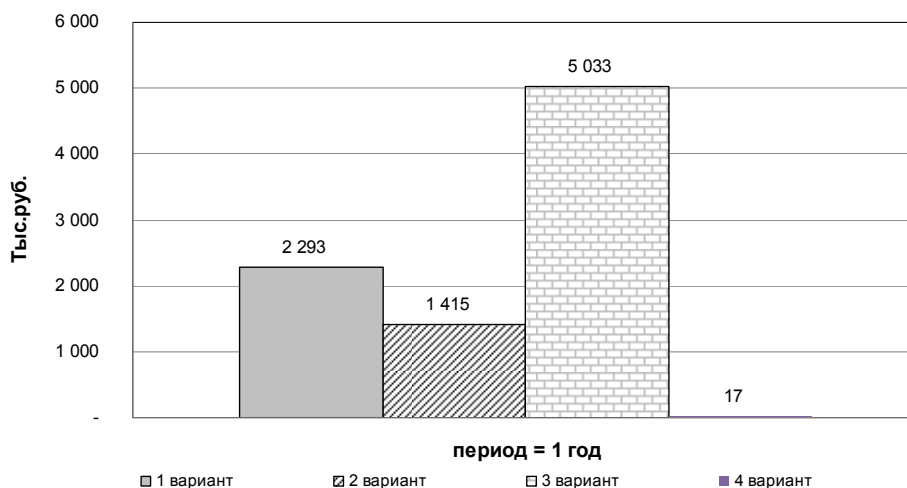
В разделе 4.4 выполнен сравнительный технико-экономический анализ по четырем вариантам мероприятий, соответствующим применению различных методов борьбы с гидратообразованием. Анализ проведен на примере шлейфа Берегового месторождения, где сравниваются операционные затраты по следующим вариантам:

- 1) закачка метанола в трубопровод с суточным массовым расходом, нормируемым предприятием;
- 2) затраты на закачку метанола в трубопровод с пересчитанным на программе «Газогидрат» оптимизированным расходом (цена за тонну метанола взята на начало 2009 года);
- 3) затраты на электрообогрев трубопровода (по данным средней стоимости промышленной электроэнергии в ЯНАО);



4) затраты на тепловое воздействие при использовании греющих трубопроводов (для обогрева теплоносителя используется промышленный газовый котел).

Наименее затратным, более чем на порядок, является способ, предусматривающий применение горячих трубопроводов, в связи с отсутствием затрат на оборотные средства и сравнительно невысокими затратами на газ для подогрева теплоносителя (рис.9).



**Рис. 9. Операционные затраты на предотвращение гидратообразования в промышленном шлейфе Берегового ГКМ**

Выводы по четвертому разделу диссертации сформулированы следующим образом:

1. Расход ингибитора гидратообразования, определенный на примере параметров Берегового газоконденсатного месторождения, может быть существенно снижен за счет оптимизации его расхода с помощью разработанных в данной работе модели и компьютерной программы.

2. Установлено, что применение электрообогрева газопровода может обеспечить безгидратный сбор продукции скважин, однако этот вариант требует значительного увеличения операционных расходов и не может быть рекомендован для рассматриваемых условий эксплуатации.

3. Предложен, исследован и обоснован метод обеспечения безгидратного сбора газа, основанный на прокладке внутри или снаружи газопровода в общей теплоизоляции греющего трубопровода с горячим теплоносителем.

4. Выполненный технико-экономический анализ эффективности мероприятий по обеспечению безгидратного сбора газа показал, что применение греющего водовода обеспечивает снижение операционных затрат более чем на порядок, по сравнению с известными способами, что позволяет рекомендовать этот способ для опытно-промышленного внедрения.

## Основные выводы и результаты работы

Основные выводы по результатам диссертационного исследования могут быть сформулированы следующим образом:

1. Разработана квазиодномерная физико-математическая модель тепломассообмена при течении в трубопроводах многокомпонентной среды – природный газ, газоконденсат, пары воды, влага и ингибитор гидратообразования, с учетом конструктивных особенностей прокладки трубопровода, характерных для реальных газосборных систем.

2. Установлено, что существенное влияние на условия гидратообразования в промысловых трубопроводах имеет не только состав газа, термобарические условия, влажность, концентрация ингибитора, но и тепловые потоки, зависящие от конструктивных особенностей прокладки трубопровода; получены неявные аналитические выражения для расчета тепловых потоков в конструкциях при наличии кожухов и в различных вариантах прокладки газопровода совместно с метанолпроводом.

3. На основе предложенной физико-математической модели тепломассопереноса разработаны итерационный алгоритм расчета и компьютерная программа, позволяющие проводить анализ влияния режимных параметров, параметров окружающей среды, состава продукции скважин, особенностей прокладки трубопроводов и расхода метанола на эксплуатационные характеристики газосборных систем; разработанная компьютерная программа может быть рекомендована для использования как на стадии проектирования систем сбора продукции газовых промыслов, так и на стадии их эксплуатации.

4. Выполненное расчетно-теоретическое исследование гидратообразования при прокладке трубопровода в кожухе и в общей теплоизоляции с метанолпроводом показывает, что объем образовавшихся газогидратов в рассматриваемых конструкциях практически одинаков, однако расположение гидратных пробок по длине трубопровода и динамика роста гидратного слоя существенно различаются, что необходимо учитывать при управлении гидратообразованием; результаты расчетного анализа показывают возможность снижения затрат метанола на 30 – 40% за счет детального прогнозирования параметров в различных сечениях трубопровода.

5. Предложен, исследован и обоснован для практического применения способ теплового воздействия, обеспечивающий безгидратный сбор продукции скважин путем прокладки горячего трубопровода внутри газопровода или снаружи в общей с газопроводом теплоизоляции. Установлено, что для обеспечения безгидратного сбора продукции скважин, при длине шлейфов 2-3 километра, для подогрева достаточно подавать горячую воду или иной теплоноситель с низкой температурой замерзания при температуре 310 – 330<sup>0</sup>К.

6. Выполненный сравнительный анализ различных способов обеспечения безгидратного сбора продукции скважин в северных климатических условиях показал, что применение предложенного способа с применением горячего трубопровода позволяет более чем на порядок сократить эксплуатационные издержки по сравнению с известными способами использования метанола или электрообогрева трубопровода.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих печатных работах:**

1. Бучинский С.В., Шабаров А.Б., Бурбасов А.Н. Проблемы и методы минимизации затрат метанола для предупреждения гидратообразования в промысловых шлейфах Берегового ГКМ, с.144 – 150. Теплофизика, Гидродинамика, Теплотехника: Сборник статей. Выпуск 4. Тюмень: Издательство Тюменский государственный университет, 2008 г.
2. Бучинский С.В., Шабаров А.Б., Бурбасов А.Н. Моделирование гидратообразования для регулирования расхода метанола при сборе природного газа. Вестник ТГУ. Выпуск №6. Издательство ТюмГУ, 2008 г., с.28 – 33
3. Бучинский С.В., Шабаров А.Б. Модель многофазного течения для регулирования подачи метанола в промысловые шлейфы. Сборник материалов VIII конференции молодых специалистов организаций, осуществляющих виды деятельности, связанной с использованием участками недр на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. / Новосибирск: Параллель, 2008 г. – с.217 - 220.
4. Бучинский, С.В. Физико-математическая модель тепломассообмена в условиях гидратообразования в промысловых газопроводах / С.В. Бучинский, А.Б. Шабаров, А.Н. Бурбасов, Г.А. Есаулков. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2009. – 20 с.
5. Бучинский, С.В. Расчетно-теоретическое исследование процессов промышленного транспорта газа / С.В. Бучинский, А.Б. Шабаров, А.Н. Бурбасов, Г.А. Есаулков. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2009. – 18 с.