

*На правах рукописи*



САРАНЧИН Николай Викторович

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ТЕЧЕНИИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ  
УГЛЕВОДОРОДНЫХ СРЕД В ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ.**

**Специальность 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Тюмень — 2010

**Работа выполнена** на кафедре Механики многофазных систем ГОУ ВПО «Тюменского государственного университета».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, с.н.с.  
**Вакулин Александр Анатольевич**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук  
доцент  
**Татосов Алексей Викторович**

доктор физико-математических наук  
доцент  
**Михайлов Павел Никонович**

**Ведущая организация:** ГОУ ВПО «Башкирский государственный университет»

Защита состоится 30 декабря 2010 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.274.10 в Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. 217 \_Физического факультета ТюмГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО «Тюменского государственного университета».

Автореферат разослан 29 ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, кандидат физико-математических наук

**А.С. Матаев**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы.**

Большой интерес к проблемам теплопереноса многофазных в системах, наблюдаемый в последние годы, объясняется значимостью этих вопросов для различных отраслей науки и техники. В нефтегазовой и химической промышленности, энергетике и др., технологические процессы часто сопровождаются образованием газожидкостных смесей или непосредственно связаны с их использованием. К такого рода процессам относится фильтрация многофазных сред в пористой среде, движение газожидкостных смесей в скважинах, трубопроводах сбора и транспортировки углеводородов, в теплообменных и перегонных аппаратах, в различного рода аппаратах с непосредственным контактом газов и жидкостей.

Существующие модели и методы расчета многофазных течений не в полной мере отражают особенности теплообмена при наличии нескольких компонент, имеющих различную температуру кипения, при различной структуре многофазного потока (расслоенный, расслоено - волновой, расслоено - волновой с перемычками, пробковый (снарядный), кольцевой, дисперсно-кольцевой, пузырьковый, эмульсионно-пузырьковый).

Таким образом, исследование закономерностей изменения основных теплофизических параметров, характеризующих течение углеводородных газожидкостных смесей, является актуальной научной проблемой. Без знания этих закономерностей нельзя обоснованно проектировать сборные трубопроводные системы, проводить анализ режимов течения многофазного потока при изменении термобарических условий и компонентного состава сред и т.д.

### **Цель диссертационной работы.**

Цель данной работы состоит в изучении теплофизических параметров углеводородных газожидкостных смесей в трубопроводных системах, создании физико-математических моделей, алгоритмов и программного комплекса для проведения расчетов параметров при различных структурах многофазного течения.

**Конкретными задачами**, решаемыми в диссертации, являются следующие:

1. Обобщить последние достижения в области теплопереноса углеводородных газожидкостных смесей;
2. Провести исследования режимов течения двухфазных потоков в трубопроводе на экспериментальном стенде;
3. Разработать расчетную модель и алгоритм для определения режимов течения, температур, давлений, объемных концентраций и скоростей фаз в квазиодномерном приближении;
4. Создать программный комплекс, позволяющий проводить расчеты теплофизических параметров углеводородных газожидкостных потоков переменного фазового состава при различных режимах течения (расслоен-

ный, расслоено - волновой, расслоено - волновой с перемычками, пробковый (снарядный), кольцевой, дисперсно-кольцевой, пузырьковый, эмульсионно-пузырьковый);

5. Провести расчетно-теоретическое исследование параметров двухфазных углеводородных потоков при различных, сменяющих друг друга структурах потока на основе разработанного программного комплекса.

**Научная новизна** результатов работы заключается в следующем:

1. Впервые получены обобщенные уравнения импульсов и полной внутренней энергии для квазиодномерного движения отдельной фазы многофазной смеси в трубопроводных системах с учетом всех существенных внешних воздействий;
2. Уточнены соотношения и разработана расчетную модель для определения температур, давления, скоростей и объемных долей фаз газожидкостных потоков при расслоенном, расслоенно - волновом, расслоенно - волновом с перемычками, кольцевом и дисперсно-кольцевом режимах течения;
3. Разработан алгоритм определения структуры течения газожидкостной смеси с использованием функций Рвачева.
4. Созданы и реализованы алгоритмы и компьютерная программа, позволяющая определять параметры углеводородных газожидкостных потоков в скважинах, межпромысловых и магистральных трубопроводах с автоматизированным выбором алгоритма расчета при смене режима течения потока.

**На защиту выносятся:**

- Физико-математическая модель квазиодномерного движения отдельных фаз многофазной углеводородной смеси в трубопроводных системах с учетом внешних воздействий;
- Методика расчета температур, давления, скоростей, равновесных молярных долей компонентов в газовой и жидкой фазах, объемных долей и теплофизических свойств фаз углеводородных газожидкостных потоков при пузырьковом, снарядным (пробковым), расслоенном, расслоенно-волновом, расслоенно-волновом с перемычками, кольцевом и дисперсно-кольцевом режимах течения;
- Расчетная модель для определения режима течения многокомпонентной газожидкостной смеси с использованием функций Рвачева.
- Алгоритмы и компьютерная программа, позволяющая определять теплофизические параметры углеводородных газожидкостных потоков в скважинах, межпромысловых и магистральных трубопроводах с учетом изменения фазового состава углеводородной смеси при смене режима течения потока.

**Достоверность результатов**, изложенных в диссертации, обусловлена корректностью применения законов и уравнений теплофизики и механики многофазных сред, удовлетворительным совпадением результатов численных расчетов с известными расчетно-теоретическими и экспериментальными данными.

**Практическая ценность работы** заключается в возможности использования результатов исследований для анализа и прогнозирования тепломассопереноса при течении углеводородных смесей в трубопроводах при изменении состава, термобарических и гидродинамических условий. Полученные результаты позволяют определять теплофизические параметры углеводородных смесей в системе сбора и транспорта продукции скважин.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на межотраслевых научных семинарах «Теплофизика, гидродинамика, теплотехника» под руководством заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н., профессора А.Б.Шабарова (2002 г., 2004 г., 2006 г., 2008 г.), семинарах по математическому моделированию под руководством д.ф.-м.н., профессора В.Н.Кутрунова (2005 г., 2006 г.), на научных семинарах кафедры механики многофазных систем ТюмГУ (2002 -2010 г.г.), на научных семинарах кафедры проектирования и эксплуатации нефтегазопроводов, баз и хранилищ ТГНГУ (2010 г.г.), обсуждались на научно-техническом семинаре физического факультета, посвященному итогам выполнения раздела приоритетного национального проекта «Образование» (ТюмГУ, 2008 г.). Разработанный автором программный продукт выставлялся на международных выставках «Нефть и газ» (2003 г., 2004 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 6 работах, в том числе в 2 статьях, входящих в перечень ВАК. Их список приведен в конце автореферата.

#### **Объем и структура работы.**

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех разделов, приложения, заключения и списка литературы. Полный объем работы 148 стр., включая 43 рис. и 8 табл. Библиография содержит 144 наименования.

#### **Благодарности.**

Автор выражает искреннюю признательность заведующему кафедрой механики многофазных сред ТюмГУ, заслуженному деятелю науки РФ, д.т.н., профессору А.Б.Шабарову за помощь при выборе направления исследований и научное руководство при разработке теплофизических моделей тепломассопереноса при движении углеводородных смесей в трубопроводах.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель, перечислены защищаемые положения, кратко изложена структура диссертации. **В первом разделе** обобщены литературные данные о достижениях в области тепломассопереноса углеводородных газожидкостных смесей, данные экспериментальных исследований и методы расчета теплофизических параметров углеводородных газожидкостных потоков в трубопроводных системах и на основании этого обзора сформулированы конкретные задачи, решаемые данной диссертационной работой.

**В разделе 1.1** приведен анализ известных методов определения теплофизических параметров течения двухфазных углеводородных жидкостей в трубо-

проводах. Исследование этих течений является до настоящего времени весьма актуальной задачей. В частности, значительный вклад в становлении гидродинамики смесей как самостоятельного раздела механики жидкости и газа внесли следующие исследователи: В.Н. Антипьев, Арманд, Ю.Т. Борщевский, А.И. Брусилковский, А.К. Галямов, Ш.Г. Гатауллин, В.Л. Гольдберг, Б.А. Григорьев, А.И. Гужов, К.Г. Донец, Ю. Т. Дюнин, Я.М. Каган, П. Л. Капица, В.К. Касперович, Г.Е. Коробков, С. И. Костерин, А.Н. Крайко, С.С. Кутателадзе, В.Х. Латыпов, А.И.Леонтьев, В. А. Мамаев, Р.Л.К. Маурин, В.Ф. Медведев, М.И. Мердух, А.М. Нечваль, Р.И. Нигматулин, Б.И.Нигматулин, Х.А. Рахматуллин, Н. И. Семенов, В.Ф. Сизов, Л.Е. Стернин, М.А. Стырикович, С. Г. Телетов, И.М. Тимерин, Ф. Франкль, В.И. Цветков, В.Я. Шкадов, Н.А. Яковлев, N. Brauner, D. Barnea, Y. Teitel, A.K. Dukler, H. Furukawa, M. Ihara, K. Kohda G.F. Hewitt и др.

**В разделе 1.2** приведены методы расчета характеристик многофазного потока в стволе скважины и их классификация. Рассмотрены методы следующих исследователей: Brill и Mukherjee; Hagedorn и Brown; Gray; Duns и Ros; Orkiszewski; Hagedorn и Brown; Griffith и Wallis; Beggs и Brill; Mukherjee&Brill; Hasan и Kabir; Ansari и др.

**В разделе 1.3** обсуждаются результаты экспериментальных исследований газожидкостных турбулентных течений в каналах. Приведены данные об особенностях различных режимов течений двухфазного потока в горизонтальных трубопроводах: пузырьковом, снарядном (пробковом), расслоенном, расслоенно-волновом, расслоенно-волновом с перемычками, кольцевом, дисперсно-кольцевом и вертикальных трубопроводах: пузырьковом, эмульсионно-пузырьковом, снарядном, пенисто-турбулентном, кольцевом, дисперсно-кольцевом.

**В разделе 1.4** приведены основные уравнения механики сплошных гетерогенных сред. Эти уравнения базируются на феноменологической теории многоскоростного континуума Х.А. Рахматуллина.

Завершающий **раздел 1.5** содержит выводы по анализу опубликованных работ, а также конкретные задачи, решаемые в данной работе.

**Во втором разделе** разработана и обоснована физико-математическая модель тепломассообмена и гидродинамики при различных структурах течения газожидкостных углеводородных сред в трубопроводах.

**В разделе 2.1** представлена общая постановка задачи о расчете квазиодномерного течения газожидкостной среды в трубопроводе и система дифференциальных уравнений описывающих поведение такой среды в трубопроводе. С использованием метода «контрольного объёма» показан вывод основных уравнений системы в алгебраической форме, когда внутренний объем трубопровода разбивается на конечное число достаточно малых участков – контрольных объемов  $V$ , ограниченных внутренней поверхностью трубопровода и поперечными сечениями  $S_1$  и  $S_2$ , расположенными на расстоянии  $\Delta x$  друг от друга. Применительно к контрольному объёму используются балансовые уравнения: массы, количества движения, а также баланса полной энергии:

- законы сохранения массы газовой и жидкой фазы при квазиодномерном подходе:

$$\begin{aligned}\rho_{2g} v_{2g} S_{2g} &= \rho_{1g} v_{1g} S_{1g} - \rho'_g v'_{ng} S'_g + J_{lg} V - \frac{\partial \rho_g}{\partial t} V, \\ \rho_{2l} v_{2l} S_{2l} &= \rho_{1l} v_{1l} S_{1l} - \rho'_l v'_{nl} S'_l + J_{gl} V - \frac{\partial \rho_l}{\partial t} V\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\rho_{2i} v_{2i} S_{2i} - \rho_{1i} v_{1i} S_{1i} = d(\rho_i v_i S_i)$ .

Это уравнение учитывает расход  $\rho'_i v'_{ni} S'_i$  через боковую поверхность, что характерно при расчетах утечек, расходы при контролируемых подводах и отводах массы в разветвленных системах трубопроводов.

- обобщенное уравнение баланса механической энергии:

$$\begin{aligned}\alpha_g \frac{v_{2g}^2}{2} + \frac{P_{2g}}{\rho_g} + g z_2 &= \alpha_g \frac{v_{1g}^2}{2} + \frac{P_{1g}}{\rho_g} + g z_1 + l_{\text{eng}}^* - l_{mpg} + \tilde{l}_g + l'_g + l_{\phi g} \\ \alpha_l \frac{v_{2l}^2}{2} + \frac{P_{2l}}{\rho_l} + g z_2 &= \alpha_l \frac{v_{1l}^2}{2} + \frac{P_{1l}}{\rho_l} + g z_1 + l_{\text{enl}}^* - l_{mpl} + \tilde{l}_l + l'_l + l_{\phi l}\end{aligned}\quad (2)$$

где  $l_{\text{eni}}^* = l_{\text{en}} - g z_1 + g z_2$ ,  $l_{\text{eni}} = \int_{ix} dx$  - удельная работа внешних сил, Дж/кг, за вычетом работы по преодолению сил тяжести.  $l_{mpi} = \left( \lambda_{mpi} \frac{\Delta x}{D} + \xi_{mi} \right) \frac{v_i^2}{2}$  - работа затрачиваемая при движении каждой из фаз на преодоление сил трения о соответствующие части стенки и местные сопротивления,  $\tilde{l}_i = -\frac{\partial v_i}{\partial t} dx$  - удельная ра-

бота сил инерции,  $l'_i = -v_{ni} \frac{\rho'_i S'_i}{\rho_i S_i} (v_{xi} - v_i)$  - работа сил, связанная с обменом импульсом при подводе или отводе массы через боковую поверхность;

$l_{\phi i} = \frac{1}{\rho_i} (P_{jix} - v_i J_{ji}) dx$  - удельная работа межфазных сил, которая при малых  $J_{ji}$  сводится к работе касательных напряжений на границе фаз,  $\rho_i \approx \frac{2\rho_{1i}\rho_{2i}}{\rho_{1i} + \rho_{2i}}$  - средняя

на участке 1-2 плотность в схеме с общим давлением фаз  $P_i = P$ . Работа касательных напряжений на границе фаз  $P_{jix}$  может быть представлена в виде:  $P_{jix} = \tau_{ep} \cdot S_g$ , где  $\tau_{ep}$  - касательное напряжение на границе жидкости и газа,  $S_g$  - площадь межфазной поверхности выделенного объема.

- интеграл сохранения внутренней энергии для однотемпературной смеси ( $T_i = T$ ) записываем в виде:

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^N G_{2i} (c_i T_2 + v_{g0}) &= \\ &= \sum_{i=1}^N G_{1i} (c_i T_1 + v_{g0}) + \sum_{i=1}^N G'_i (c_i T' + v_{g0}) + \frac{\partial \left( \sum_{i=1}^N \rho_i v_i \right)}{\partial t} V + Q_{\text{en}} + N_{mp}\end{aligned}\quad (3)$$

где  $G'_i = -\rho'_i v_i^{(n)} S'$  — расход подводимый через боковую поверхность;  $Q_{\text{вн}}$  — внешняя тепловая мощность;  $N_{\text{мп}} = l_{\text{мп}} G$  — мощность внутренних вязких сил;  $v_{g0} = l_{gl} + (c_l - c_{vg})(T - T_0) + \frac{P_0}{\rho_l^{(0)}} - \frac{P_0}{\rho_g^{(0)}}$  — константа, находящаяся из условий нормировки при фазовых переходах  $l \leftrightarrow g$ . Нестационарность течения и продольный перенос тепла в дальнейшем не учитывались.

**В разделе 2.2** приведены замыкающие соотношения для каждого из реализуемых режимов течения газожидкостного потока в горизонтальных, слабо-наклонных и вертикальных трубопроводах.

Приведены алгоритмы расчета теплофизических свойств газожидкостной смеси по модели “черной нефти” (black oil) и с использованием единых уравнений состояния (ЕУС).

Математическое моделирование фазового состояния систем природных углеводородов обычно включает решение следующих основных задач: - определение составов и количественного соотношения равновесных паровой и жидкой фаз при заданных давлении, температуре и общем составе смеси; - расчет давления начала конденсации (точки росы) газовой фазы заданного состава при заданной температуре; - вычисление давления насыщения (начала кипения) жидкой фазы заданного состава (например, пластовой нефти) при заданной температуре.

В качестве уравнений состояния фаз в данной работе использовались единые кубические уравнения состояния Соава-Редлиха-Квонга (SRK), Пенга-Робинсона (PR) и Брусиловского. Данные уравнения состояния являются уравнениями состояния Ван-дер-Ваальсового типа и широко используются в задачах проектирования, разработки и эксплуатации месторождений природных углеводородов, а также при моделировании процессов химической технологии. Эти уравнения являются частными формами четырехкоэффициентного уравнения состояния следующего вида:

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{(v + c)(v + d)} \quad (4)$$

где  $b, c, d$  - коэффициенты, постоянные для данного вещества; коэффициент  $a$  зависит от температуры ( $a = a_c \varphi(T)$ , где  $a_c$  - константа,  $\varphi$  - температурная функция, равная единице при критической температуре).

Структура коэффициентов уравнения состояния определяется следующим образом:

$$a_c = \alpha R^2 T_c^2 / p_c, \quad b = \beta RT_c / p_c, \quad c = \sigma RT_c / p_c, \quad d = \delta RT_c / p_c, \quad \text{где}$$

$$\alpha = \Omega_c^3 = \beta \quad Z_c^* + \Omega_c - 1, \quad \sigma = -Z_c^* + \Omega_c \left[ 0.5 + (\Omega_c - 0.75)^{1/2} \right], \quad \delta = -Z_c^* + \Omega_c \left[ 0.5 - (\Omega_c - 0.75)^{1/2} \right]$$

Здесь  $Z_c, \Omega_c$  - независимые параметры уравнения состояния. Их значения наряду с функцией  $\varphi(T)$  полностью определяют уравнение состояния чистого вещества.



Использование уравнений состояния Ван-дер-Ваальсового типа для смесей основано на применении принципа соответственных состояний. При этом уравнения состояния смесей имеют тот же вид, что и для чистых веществ. Но если коэффициенты уравнения состояния чистого вещества определяются свойствами этого вещества, то коэффициенты уравнения состояния многокомпонентной системы определяются свойствами смеси, т.е. свойствами компонентов, образующих смесь, и долей каждого из них в смеси.

При использовании уравнений состояния для N – компонентной углеводородной смеси нами были приняты следующие правила для вычисления коэффициентов уравнения состояния:

$$a_{sm} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j a_{ij}, \quad b_{sm} = \sum_{i=1}^N x_i b_i, \quad c_{sm} = \sum_{i=1}^N x_i c_i, \quad d_{sm} = \sum_{i=1}^N x_i d_i,$$

где  $a_{ij}$  – перекрестные коэффициенты для смеси, которые рассчитываются способом предложенным Зудкевичем и Иоффе  $a_{ij} = (1 - c_{ij})(a_i a_j)^{0.5}$ .

Введение коэффициентов  $c_{ij}$  существенно повышает точность расчета парожидкостного равновесия с применением уравнения состояния. Значения коэффициентов  $c_{ij}$  для использованных нами уравнений состояния были внесены в созданную базу данных.

Расчет 2-фазного равновесия пар-жидкость смеси заданного состава осуществляется решением системы  $2N+2$  уравнений, которая имеет вид:

$$\begin{cases} f_{i,L} - f_{i,V} = 0, & i = \overline{1, N} \\ x_i L + y_i V - z_i = 0, & i = \overline{1, N} \\ \sum_{i=1}^N y_i - 1 = 0 \\ L + V = 1 \end{cases} \quad (5)$$

В системе (5) первые N уравнений описывают условия термодинамического равновесия - равенство летучестей компонентов в сосуществующих паровой и жидкой фазах. Следующие N уравнений описывают материальный баланс компонентов в фазах. Летучести компонентов в паровой  $f_{i,V}$  и жидкой  $f_{i,L}$  фазах рассчитываются на основе известных термодинамических соотношений с использованием единых уравнений состояния фаз в виде (4) с соответствующими коэффициентами для уравнений состояния Соава-Редлиха-Квонга, Пенга-Робинсона и Брусилковского по формуле:

$$\ln \frac{f_i}{x_i p} = -\ln(z - B_{sm}) - \frac{A_{sm}}{C_{sm} - D_{sm}} \left( \frac{2 \sum_{j=1}^N x_j a_{ij}}{a_{sm}} - \frac{c_i - d_i}{c_{sm} - d_{sm}} \right) \ln \left( \frac{z + C_{sm}}{z + D_{sm}} \right) +$$

$$+ \frac{B_i}{z - B_{sm}} - \frac{A_{sm}}{C_{sm} - D_{sm}} \left( \frac{C_i}{z + C_{sm}} - \frac{D_i}{z + D_{sm}} \right).$$

**В разделе 2.3** исследуется расслоенное течение жидкости и газа в цилиндрической трубе. Для этого режима выведено соотношение для  $\tau_{zp}$ . Основными параметрами, определяющими состояние поверхности раздела, являются объемное расходное газосодержание  $\beta_g = \frac{Q_g}{Q}$  и число Фруда смеси  $Fr = \frac{v_{см}^2}{gD}$ . Поскольку в общем случае длины и амплитуды волн являются случайными величинами, структуру поверхности раздела можно характеризовать среднеквадратичным значением отклонений поверхности раздела от среднего или невозмущенного положения уровня жидкости.

$$\sigma = \sqrt{(H - \bar{H})^2}, \quad (6)$$

где  $\sigma$  — дисперсия волн;  $H$  — мгновенное значение толщины жидкой пленки;  $\bar{H}$  — осредненная во времени толщина жидкой пленки.

Значение среднеквадратичного отклонения может служить мерой высоты волн от гребня до впадины, а также его можно рассматривать как эффективную шероховатость поверхности раздела в разделенном потоке и таким образом определить касательное напряжение трения  $\tau_{zp}$  между газом и жидкостью.

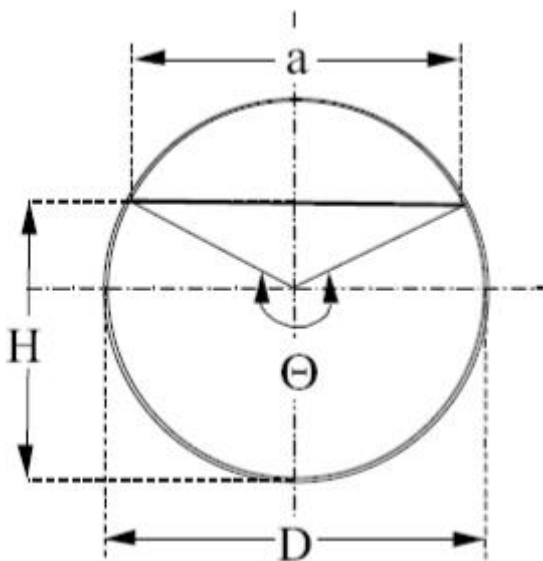
На основании данных экспериментального исследования ряда авторов приводится зависимость дисперсии волн на поверхности раздела фаз от средней толщины жидкой пленки  $\bar{H}$

$$\frac{g\sigma}{u_*^2} = 0.072 \left( \frac{g\bar{H}}{u_*^2} \right)^{2/3},$$

которая может быть преобразована к виду:

$$\sigma = 0.072 \left( \frac{u_* \bar{H}}{g^{1/2}} \right)^{2/3}, \quad (7)$$

где  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_g}}$  — динамическая скорость газа и  $\tau_0$  — касательное напряжение для газа о стенки трубопровода.



**Рис. 1.** Геометрические характеристики «живого» сечения, при расслоенном течении.

Если выразить  $\bar{H}$  через центральный угол, стягивающий поверхность раздела фаз  $\bar{H} = \frac{D}{2} \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right)$  и касательное напряжение для газа о стенки трубопровода выразить через коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda_0$  в виде  $\tau_0 = \frac{\lambda_0}{8} \rho_g v_g^2$ , где  $\lambda_0 = \lambda_0(\text{Re}, \varepsilon)$  и может быть вычислен по зависимости  $u_* = \frac{v_g}{2} \sqrt{\frac{\lambda_0}{2}}$ . Подставляя полученные зависимости в (7) и полагая, что амплитуду волн на поверхности раздела фаз можно принять равной дисперсии волн получим:

$$A = \sigma \cdot 0.072 \left( \frac{v_g}{4} \cdot \frac{D \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right)}{g^{1/2}} \right)^{2/3} \cdot \left( \frac{\lambda_0}{2} \right)^{1/3}. \quad (8)$$

Касательное напряжение на межфазной поверхности представляется в виде:

$$\tau_{zp} = \frac{\lambda_{zp}}{8} \rho_g v_g^2, \quad (9)$$

$$\text{где } \lambda_{zp} = \lambda_0 \left( \text{Re}_g, \frac{A}{D} \right).$$

Проведено сравнение касательных напряжений на межфазной поверхности найденных различными авторами. Так, например, Фишер В.А., Ваганов С.И., Сабитов С.З. приводят зависимость для вычисления коэффициента гидравлического сопротивления для газа в расслоенном газожидкостном потоке в виде:

$$\lambda_g^* = a \text{Re}_l^b \text{Re}_g^c \alpha_g^d, \quad (10)$$

где  $a = 0.0093$ ,  $b = -0.058$ ,  $c = 0.156$ ,  $d = 0.783$ ,  $\text{Re}_l$ ,  $\text{Re}_g$  – число Рейнольдса для жидкости и газа,  $\alpha_g$  – истинная объемная доля газовой фазы.

Petalas&Aziz (1998) величину касательного напряжения на границе раздела фаз рекомендуют рассчитывать по формуле

$$\tau_{zp} = \left( 0.004 + 0.5 \cdot 10^{-6} \text{Re}_l \right) Fr_l^{1.335} \rho_g \frac{v_g^2}{D_g},$$

(11)

где  $\text{Re}_l = \frac{\alpha_l v_l \rho_l D}{\mu_l}$  – число Рейнольдса жидкости;  $Fr_l = \frac{v_l}{\sqrt{gH}}$  – число Фруда

жидкости;  $D_g$  – безразмерный гидравлический диаметр жидкости, который в принятых обозначениях можно выразить через центральный угол  $\theta$  в виде

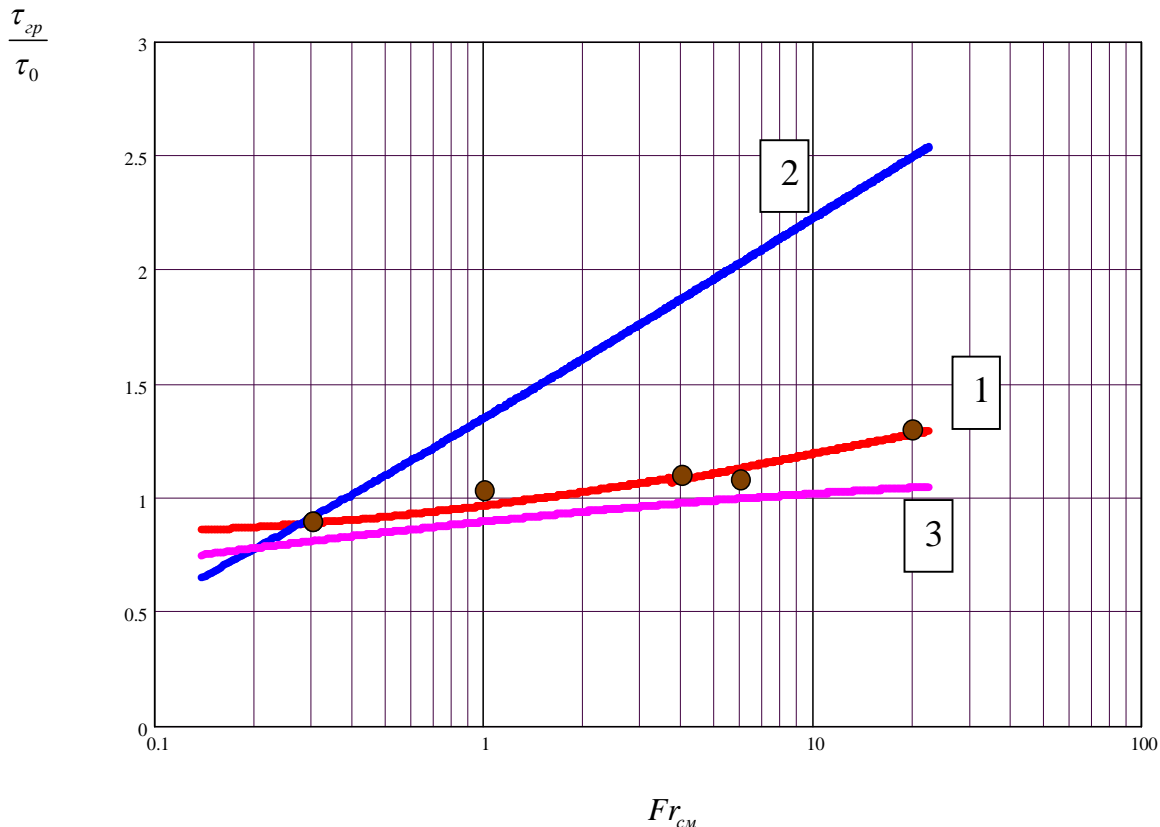
$$D_g = \frac{S_g}{D \cdot P_{смоч}} = \frac{2\pi - \theta + \sin \theta}{8 \left( \sin \frac{\theta}{2} + \pi - \frac{\theta}{2} \right)}. \text{ Сравнивая (7) с видом зависимости для касательно-$$

го напряжения на границе раздела фаз  $\tau_{zp} = \frac{\lambda_{zp}}{8} \rho_g v_g^2$  принятого нами можно сделать вывод, что в (9) выражение

$$\lambda_{zp} = 8 \cdot (0.004 + 0.5 \cdot 10^{-6} \text{Re}_l) \frac{Fr_l^{1.335}}{D_g} \quad (12)$$

определяет величину коэффициента гидравлического сопротивления на межфазной поверхности.

На рис. 2 приводится сравнение зависимости касательного напряжения на границе раздела фаз вычисленных с использованием формул (9), (10), (12) и экспериментальными данными при значении истинного объемного газосодержания  $\alpha_g = 0.8$  от числа Фруда смеси.



**Рис. 2.** Сравнение зависимости касательных напряжений на границе раздела фаз от числа Фруда смеси.

Кривая 1 — формула (9); 2 — с использованием формулы (10); 3 — формула (12);  
 • — экспериментальные данные (Одишария Г.Э., Точигин А.А.).

Из сравнения видно, что предложенная нами методика определения межфазного касательного напряжения дает наилучшее совпадение с экспериментальными данными.

**В разделе 2.4** исследуется кольцевой и дисперсно-кольцевой режимы течения газожидкостной смеси. Данные режимы тоже можно назвать разделенными режимами и для них записать определяющие уравнения для каждой фазы в отдельности.

Для дисперсно-пленочного газожидкостного потока уравнения баланса массы, импульса и энергии записаны в дифференциальной форме предложенной Р.И. Нигматулиным:

$$\frac{dG_1}{dt} = J_{31} + J_{21}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dG_2}{dt} &= -J_{21} + J_{32} - J_{23} \\
\frac{dG_3}{dt} &= -J_{31} - J_{32} + J_{23} \\
(\rho_G^\circ \alpha_1 + \rho_L^\circ \alpha_2) \frac{dv_1}{dt} &- (\alpha_1 + \alpha_2) \frac{\partial p}{\partial z} - F_{13} + (J_{31} + J_{32})(v_{31} - v_1) \\
\rho_L^\circ \alpha_3 \frac{dv_3}{dt} &= -\alpha_3 \frac{\partial p}{\partial z} + F_{13} - F_w - (J_{31} + J_{32})(v_{31} - v_2) + J_{23}(v_1 - v_3) \\
\rho_G^\circ c_G \alpha_1 \frac{dT_G}{dt} + \rho_L^\circ c_L \alpha_2 \frac{dT_2}{dt} + \rho_L^\circ c_L \alpha_3 \frac{dT_3}{dt} &= \frac{\partial p}{\partial t} + Q_w \\
\rho_G^\circ \alpha_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} &= Q_F - Q_w
\end{aligned} \tag{13}$$

Индекс 1 в (11) относится к газовому ядру, 2 — к каплям жидкости в ядре, 3 — к пленке жидкости текущей по внутренней поверхности трубы.  $G_i$  — массовые расходы фаз.  $J_{ij}$  — интенсивности массообмена между фазами.  $J_{31}$ ,  $J_{21}$  — массообмен за счет испарения жидкости с пленки и с капель.  $F_w$ ,  $F_{13}$  — Сила трения жидкой пленки о стенки трубы и сила межфазного трения между газокапельным ядром и жидкой пленкой.

Интегрирование системы уравнений проводилось с помощью метода контрольного объема. При её математическом описании учтена возможность срыва потоком газа капель с поверхности жидкости и возвращение их в неё. В связи с этим вводится понятие третьей фазы (капель в газокпельном ядре). При такой постановке задачи кольцевой режим можно считать частным случаем дисперсно-кольцевого (доля капель в газовой фазе  $\alpha_d$  равна нулю, капельная фаза отсутствует).

**В разделе 2.5** исследуется пузырьковый режим течения. Для пузырькового течения характерно присутствие отдельных пузырьков в непрерывной жидкой среде. Область объемных газосодержаний, соответствующих пузырьковому течению, простирается от одиночного изолированного пузырька в большом объеме жидкости до квазисплошного течения пены, когда на долю жидкости приходится менее 1% объема среды. Взаимодействиями между силами поверхностного натяжения, вязкости, инерции и подъемными силами обусловлен целый ряд эффектов, часто проявляющихся в различной форме пузырьков и траекторий их движения. Режим течения, при котором размеры пузырей столь велики, что они приобретают цилиндрическую форму и почти полностью заполняют объем канала, называется снарядным и будет рассмотрен в следующем разделе.

В этом режиме используется известная модель скорости дрейфа, представляющая собой по существу модель раздельного течения, в которой нас интересует не движение отдельных фаз, а их относительное движение. Применяется понятие скорости дрейфа  $v_{gl}$ , определяемой как разность между скоростью компонента и скоростью смеси.

**В разделе 2.6** моделируется снарядный (пробковый) режим течения в вертикальных, горизонтальных и слабонаклонных трубопроводах. Снарядное течение характеризуется последовательным прохождением по каналу одиноч-

ных больших пузырей, занимающих почти все его поперечное сечение. Разработанный алгоритм расчета параметров течения при таком режиме мы использовали и для расслоенно-волнового с перемычками режима течения газожидкостной углеводородной смеси при горизонтальном расположении трубопровода.

**В разделе 2.7** исследованы критерии смены структуры течения в трубопроводах. Сформулированы особенности расчета газожидкостных потоков, когда при движении такой смеси изменяется режим течения вдоль оси трубопровода и разработана методика расчета параметров течения газожидкостных потоков при изменении структуры потока.

Для двухфазных потоков в трубопроводе структура потока является определяющим фактором при нахождении важнейших характеристик потока, таких как градиент давления, коэффициент теплопередачи и др. Моделирование процессов кипения и конденсации в неизотермических трубопроводах и вообще процессов массообмена между фазами также невозможно без знания структуры потока. Таким образом, прогноз режима течения, который реализуется на данном участке трубопровода, является важнейшим элементом расчета параметров двухфазного потока и определяет условия замыкания общей системы дифференциальных уравнений, описывающих течение двухфазного потока в трубопроводе.

**В разделе 2.7.2** приведено обоснование выбора диаграммы Бейкера для идентификации структуры течения. Ниже приведена табл. 1, которая показывает процент корректных идентификаций для различных режимов течения, полученных с применением диаграмм Малышева (MAL), Baker (BAK), Soliman и Azer (SAA), Бребера (BRE), Тандона (TAN), Ван Дер Ягта (VDJ), Mandhane (MAN), Тейтеля и Даклера, (TAD). Из приведенной таблицы видно, что достоверность идентификации режимов течения по диаграмме Бейкера одна из наилучших. Однако для волнового режима течения автором данной работы введено уточнение, приведенное в разделе 3.1.

**Таблица 1.** Результаты проверки достоверности идентификации режимов течения.

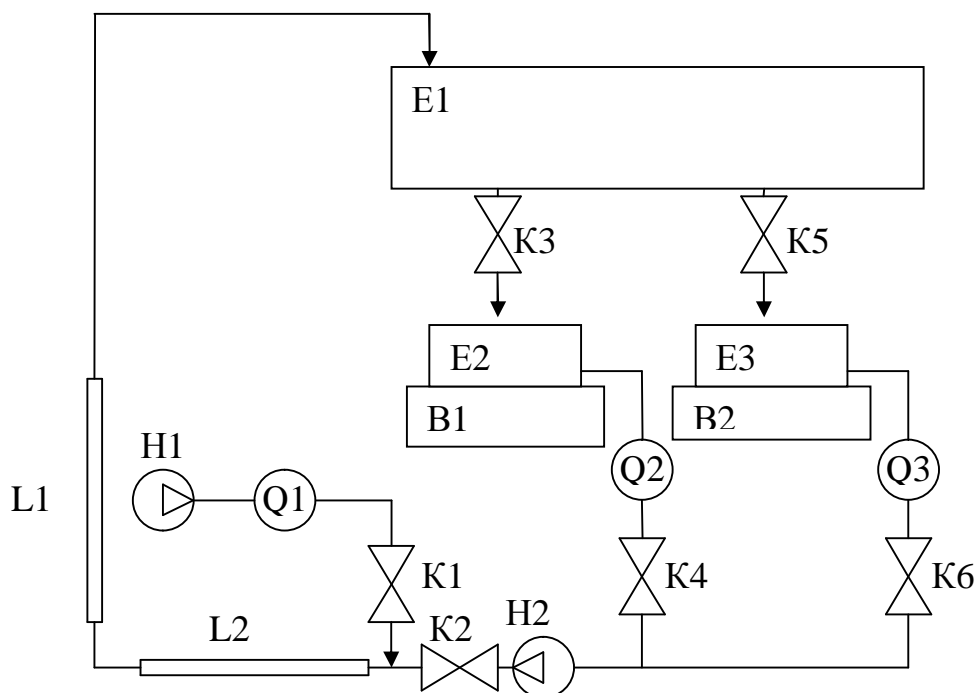
	Пузырь- ковый	Снаряд- ный	Волно- вой	Расс- лоенн.	Волновой- кольцевой	Кольце- вой	Дисперс- ный
MAL	—	74 %	52 %	36 %	39 %	82 %	—
<b>BAK</b>	<b>62 %</b>	<b>84 %</b>	<b>27 %</b>	<b>73 %</b>	—	<b>52 %</b>	—
SAA	—	28 %	96 %	—	—	80 %	37 %
BRE	—	76 %	10 %	—	55 %	99 %	—
TAN	—	—	—	12 %	80 %	99 %	32 %
VDJ	58 %	52 %	26 %	62 %	—	74 %	—
MAN	26 %	30 %	—	15 %	70 %	61 %	—
TAD	43 %	—	61 %	54 %	66 %	92 %	—

**В разделе 2.8.** приведены основные выводы по разделу 2.

**В третьем разделе** описан испытательный стенд для моделирования двух и трехфазных (водонефтегазовых) потоков, проведены экспериментальные ис-

следования позволившие уточнить границы смены структур течения на диаграмме Бейкера.

**В разделе 3.1.** описан испытательный стенд для моделирования двух и трехфазных (водонефтегазовых) потоков. При участии автора в лаборатории теплофизики физического факультета ТюмГУ была создана экспериментальная установка для изучения течения водогазонефтяного потока. Для имитации нефти применялось трансформаторное масло, пластовой воды – водопроводная вода, газа - воздух из атмосферы. Для ускорения сепарации в смесь был добавлен деэмульгатор. На рисунке 3. представлена схема установки.

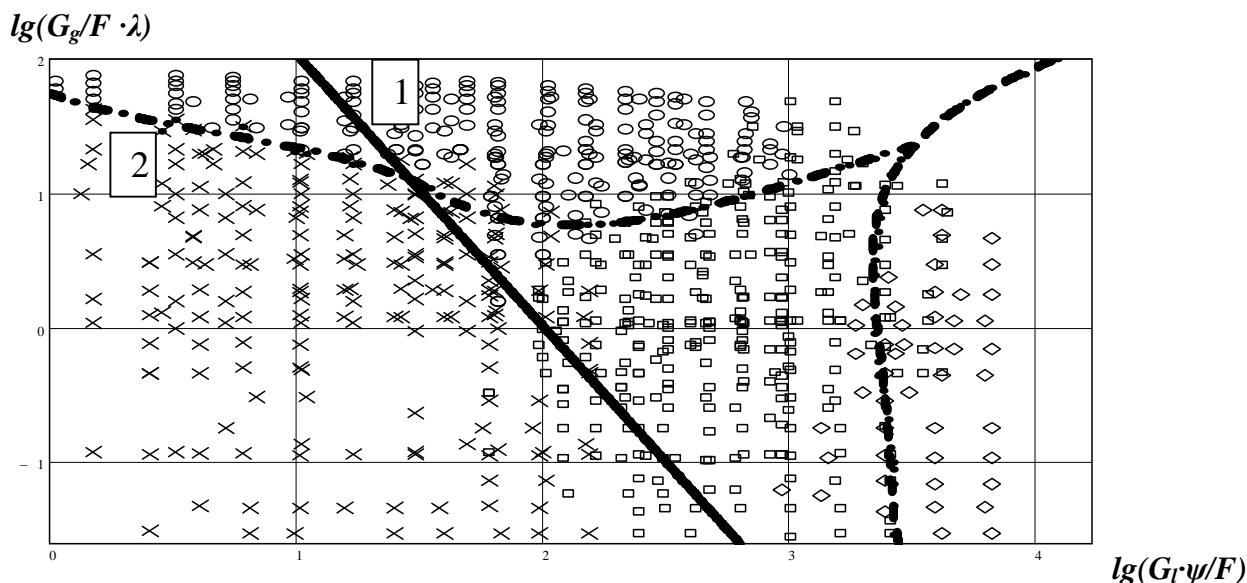


**Рис. 3.** Установка для имитации водогазонефтяного потока.

Сепаратор E1 служит для разделения смеси. После сепарации масло поступает в емкость E2, вода – в емкость E3. Емкости установлены на весах B1 и B2, которые подключены к компьютеру (показания снимаются каждую секунду). Масло и вода через расходомеры Q2 и Q3 поступает во всасывающий коллектор насоса H2, где происходит смешение компонентов. Процентное соотношение компонентов регулируется кранами K3 и K5. Кран K2 служит для регулирования расхода смеси. Воздух из атмосферы подается компрессором H1 через счетчик Q1. Регулирование содержания газа в смеси осуществляется при помощи крана K1. На установке предусмотрен прозрачный участок трубы L1 – вертикальный, что позволяет визуально наблюдать режим течения смеси. Максимальные объемы емкостей: E1 – 100 л., E2 и E3 - 50л.

**В разделе 3.2** проведено экспериментальное исследование по определению структуры течения газожидкостного потока. По результатам настоящего исследования, а также с учетом экспериментальных данных Shoham (1982), Spedding & Nguyen (1976), Kokal & Stanislay (1987) выполнена модификация известной диаграммы Бейкера. Уточнена граница перехода от расслоенно-волнового к дисперсно-кольцевому режиму течения и обоснована примени-

мость модифицированной диаграммы Бейкера для идентификации структуры течения при автоматизации выбора алгоритма расчета параметров течения газожидкостной смеси со сменой структуры потока.



**Рис.4.** Модифицированная диаграмма Бейкера  
(граница перехода от расслоено- волнового к кольцевому режиму течения 1 – исходная, 2 – модифицированная).

На Рис.4. приведена модифицированная диаграмма Бейкера с аппроксимированными в среде MathCad границами смены режима течения. Достоверность определения дисперсно-кольцевого режима течения после модификации повышена с 77.2% до 93.9%.

**В разделе 3.3** описан алгоритм определения режима течения с использованием модифицированной диаграммы Бейкера, построенный на использовании аппарата Булевой алгебры ( $R$  – функции Рвачева), с помощью которой определяется область существования того или иного режима течения по аппроксимированным границам перехода одного режима течения в другой на модифицированной диаграмме.

**В разделе 4** разработана методика, и алгоритм расчета равновесных параметров газожидкостной смеси углеводородов в трубопроводах с помощью единых уравнений состояния, приведены блок-схемы алгоритмов определения структуры и расчета параметров течения для каждой из структур потока существующих при данных теплогидравлических условиях в сечениях трубопровода. Все алгоритмы построены на решении системы уравнений квазиодномерного движения каждой фазы в пределах контрольных объемов. Дано описание интерфейса работы компьютерного комплекса, позволяющего рассчитывать параметры газожидкостного потока, необходимых для принятия решений при проектировании трубопроводов или оптимизации режимов работы трубопроводных систем находящихся в эксплуатации. Приводятся результаты расчетно-параметрического исследования параметров течения газожидкостной среды при различных термобарических условиях и различных компонентных составах углеводородной смеси.



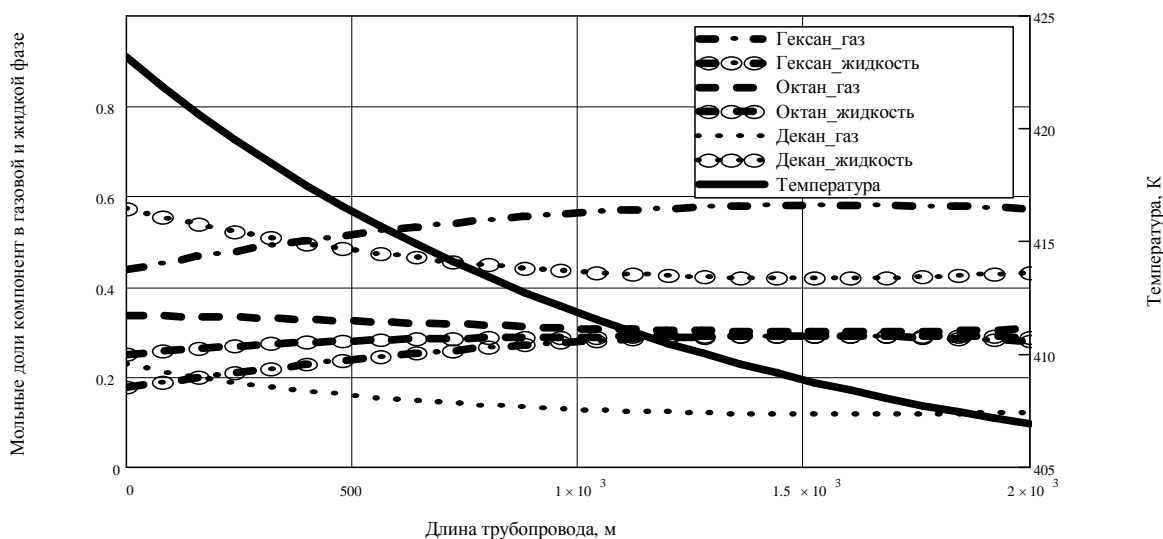
**В разделе 4.1** разработана методика, и алгоритм расчета равновесных параметров газожидкостной смеси углеводородов в трубопроводах с помощью трех различных уравнений состояния (Соава-Редлиха-Квонга, Пенга-Робинсона и Брусилковского). Достоверность и адекватность методики и алгоритма расчета равновесных параметров газожидкостной смеси углеводородов выполнена на тестовом примере. Определены расходы компонент в жидкой и паровой фазах и рассчитаны параметры равновесной трехкомпонентной смеси с объемной концентрацией компонент во входном сечении: 0,26 — н-Гептана, 0,28 — н-Октана и 0,46 — н-Декана, в трубопроводе диаметром  $d=0.108$  м со скоростью смеси  $v=10$  м/с.

**Таблица 2.** Состав и параметры исходной смеси и результаты расчета по методике В.Н. Луканина и др. и с использованием предложенной методики.

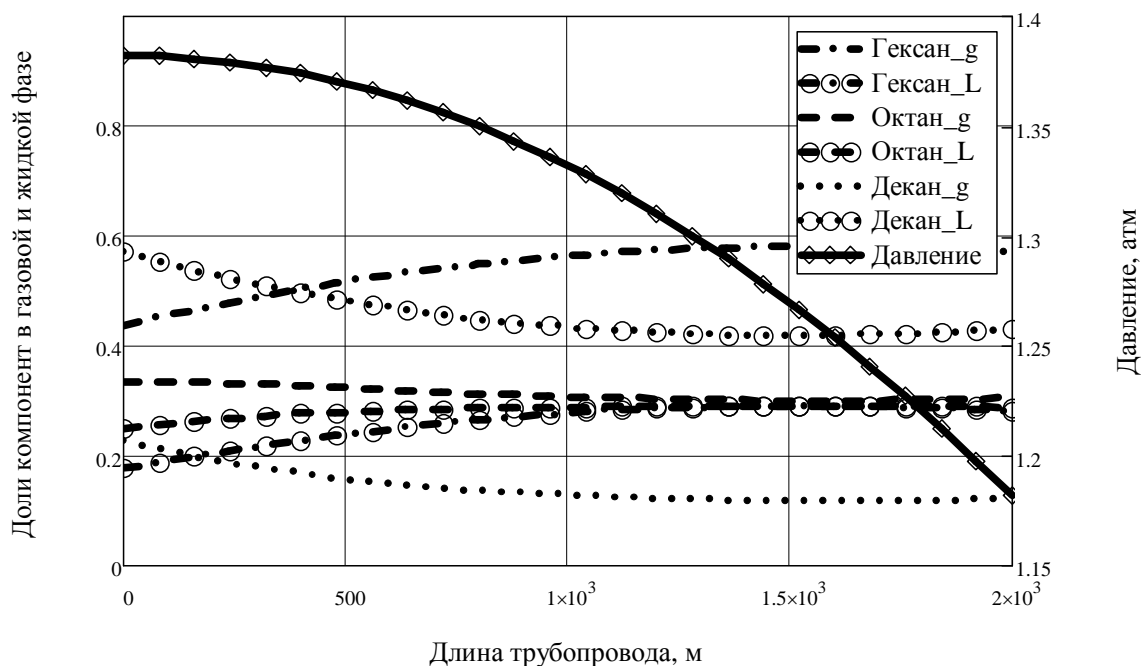
Компонент	Объемная доля компонента $i_{об}$	Нормальная температура кипения $t_s, ^\circ\text{C}$	Количество молей в смеси $N_{i0}$	Молярная доля компонента $x_{i0}$	Молярная масса $\mu$ , кг/кмоль	$K_i$ В.Н. Луканин	$K_i$ по предложенной методике	$p_i$ В.Н. Луканин	$p_i$ по предложенной методике	$x_i$ В.Н. Луканин	$x_i$ по предложенной методике
н-Гептан	0,26	98	1,53	0,30	100	2,520	2,463	0,464	0,437	0,184	0,177
н-Октан	0,28	126	1,50	0,29	114	1,300	1,341	0,346	0,335	0,267	0,250
н-Декан	0,46	176	2,09	0,41	142	0,360	0,398	0,197	0,228	0,547	0,573
Смесь	1,0	-	5,12	1,00	~121,3	-	-	1,007	<b>1,000</b>	0,998	<b>1,000</b>

В таблице 3. приводится сопоставление расчетов констант равновесия  $K_i$  и молярных долей компонента в газовой  $p_i$  и жидкой  $x_i$  фазе приведенных В.Н. Луканиным и найденных по предложенной методике, которое показывает идентичность результатов.

На рис. 5 и рис. 6 представлено изменение молярных долей и констант равновесия компонент в газовой и жидкой фазе при модельном изменении термобарических условий по длине трубопровода для смеси трех углеводородов из таблицы 3.



**Рис. 5.** Изменение молярных долей и температуры компонент в газовой и жидкой фазе по длине трубопровода.

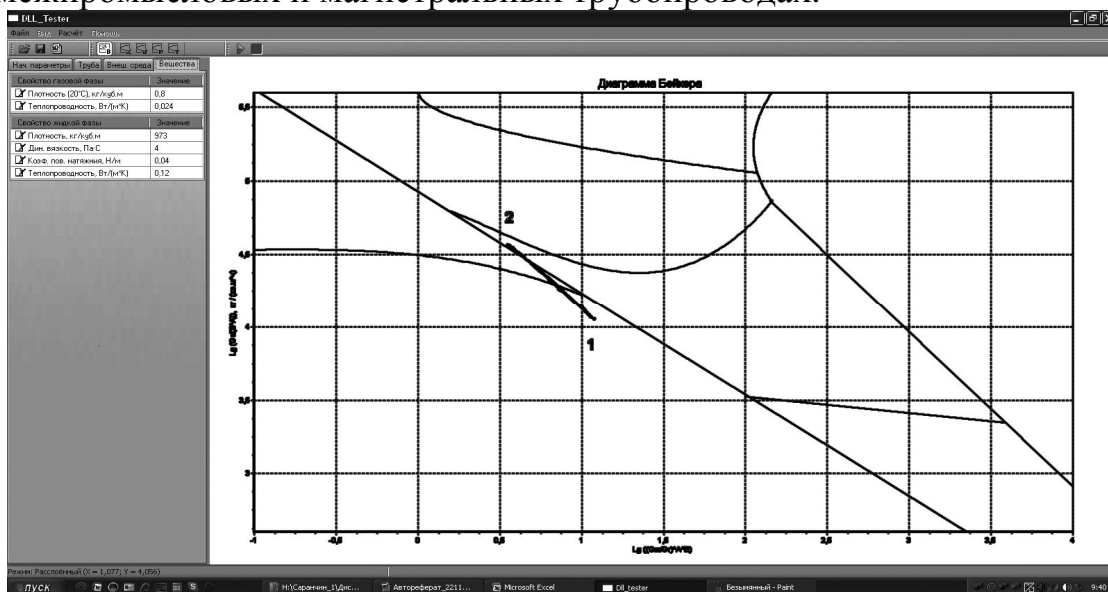


**Рис.6.** Изменение констант равновесия и давления по длине трубопровода.

В разделе 4.2. приведены алгоритмы расчета основных режимов многофазного течения в трубопроводе и методика расчета при смене структуры газожидкостного потока в исследуемом трубопроводе.

Показано (рис. 7), что при изменении термобарических условий и фазового состава происходит смена режима течения в трубопроводе, что отображается движением точки, указывающей режим течения на диаграмме Бейкера из области соответствующей расслоенному режиму течения в расслоено-волновой и затем в снарядный (пробковый).

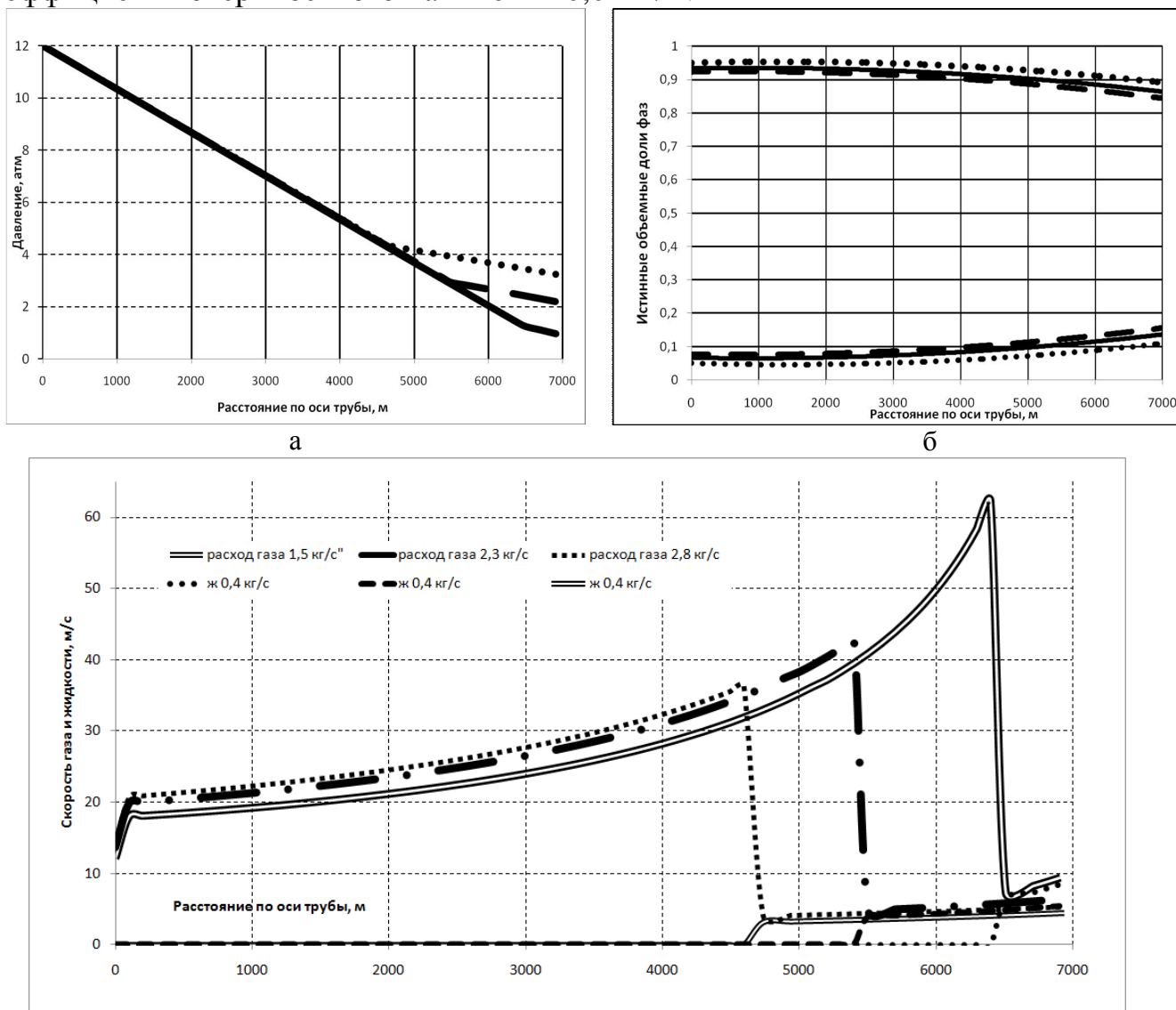
В разделе 4.3. дано описание программы позволяющей определять теплофизические параметры углеводородных газожидкостных потоков в скважинах, межпромысловых и магистральных трубопроводах.



**Рис. 7.** Индикация режима течения в созданном программном комплексе.  
1 – 2 - Траектория движения точки-индикатора режима течения на режимной диаграмме.

**В разделе 4.4.** приводятся результаты расчетно-параметрического исследования параметров течения газожидкостной среды по моделям «Black Oil» и по методике с расчетом равновесных параметров многокомпонентной смеси углеводородов при различных термобарических условиях.

В качестве примера рассмотрен поток жидких и газообразных углеводородов в трубе длиной 7 км, с толщиной стенки 7 мм и внутренним диаметром 0,516 м при угле наклона в  $1^\circ$ . Абсолютная шероховатость поверхности трубопровода и теплопроводность материала составляли 0,03 мм и 46 Вт/(м\*К) соответственно. На входе поток подавался при постоянном давлении в 12 атм, при этом температуры газа и жидкости были равными  $10^\circ\text{C}$ . Температура внешней среды составляла  $-12^\circ\text{C}$ . Расположение трубопровода – надземное. Расчеты производились для фаз со следующими свойствами: газ имел плотность 0,8 кг/куб.м и теплопроводность 0,024 Вт/(м\*К); жидкая фаза имела плотность 973 кг/куб.м, теплопроводность 0,12 Вт/(м\*К), динамическую вязкость 4 Па\*с и коэффициент поверхностного натяжения 0,04 Н/м.



**Рис. 8.** Изменение (а – давления, б – истинных объемных долей, в - скоростей газа и жидкости) при течении двухфазной углеводородной смеси в трубопроводе.

Результаты расчетно-параметрического исследования представлены на рис. 8. Исследование изменения основных теплогидравлических параметров по длине трубы проводилось с различными массовыми расходами газовой фазы при постоянном массовом расходе жидкой фазы в 0,4 кг/с. Массовый расход газа варьировался от 1,5 кг/с до 2,8 кг/с, при этом определялся режим течения, точки смены режима, а так же объемное содержание, скорости, давление и температуры газа и жидкости по длине трубы в том числе при смене режима течения.

Качественный вид пространственной структуры газожидкостного потока определен с использованием известного программного комплекса FLOW – 3D. На основе разработанного алгоритма и программы определены осредненные по сечению параметры фаз и смеси в целом. Установлено существенное изменение градиента давления и скоростей газовой и жидкой фаз при переходе от расслоено-волновой структуры течения к снарядной (пробковой) структуре течения. Скорость газовой фазы при этом резко снижается, а скорость жидкой фазы – возрастает, т.к. при такой смене режима течения жидкая фаза полностью перекрывает поперечное сечение трубопровода (возникает жидкая «пробка») и в дальнейшем газ и жидкость движутся с приблизительно одинаковыми скоростями.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Разработана теплофизическая модель, основанная на уравнениях баланса массы, импульсов, внутренней энергии и единых для газа и жидкости уравнений состояния, для нестационарного квазиодномерного течения отдельных фаз многофазной многокомпонентной углеводородной смеси в трубопроводных системах;
2. Уточнены соотношения для определения температур, давления, скоростей и объемных долей фаз газожидкостных потоков при расслоенном, расслоенно - волновом, расслоенно - волновом с перемычками, кольцевом и дисперсно-кольцевом режимах течения;
3. Разработан алгоритм определения структуры течения газожидкостной смеси с использованием функций Рвачева, позволяющий автоматизировать процесс сквозного расчета многофазного потока в трубопроводе.
4. Экспериментально подтверждена достоверность определения структуры течения газожидкостного потока в соответствии с разработанным в работе алгоритмом. Уточнена граница перехода от расслоено-волнового к дисперсно-кольцевому режиму.
5. Созданы и реализованы алгоритмы и компьютерная программа, позволяющая определять теплофизические параметры углеводородных газожидкостных потоков в скважинах, межпромысловых и магистральных трубопроводах.

6. Проведено расчетно-параметрическое исследование теплофизических параметров и фазового состава при течении многокомпонентной смеси углеводородов в конденсатопроводе.

**Публикации по теме диссертационного исследования:**

1. Саранчин Н.В., Кутрунов В.Н. «Метод автоматизации расчета параметров течения нефтегазовой смеси в трубопроводах». Нефть и газ. Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2006
2. Шабаров А.Б., Саранчин Н.В. «Методика расчета равновесных параметров газожидкостной смеси углеводородов в трубопроводах», 2009. Тюмень: Издательство ТюмГУ, Вестник Тюменского государственного университета, № 6. — С. 112-119.
3. Шабаров А.Б., Вакулин А.А. Саранчин Н.В. «Исследование газожидкостных потоков в трубопроводах». Сборник научных трудов «Теплофизика, гидродинамика, теплотехника». Вып. 3, Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2007
4. Шабаров А.Б., Саранчин Н.В., Новиков А.В. «Моделирование расслоенного газожидкостного потока в трубопроводах». Сборник научных трудов «Образование через науку и инновации». Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2005, с. 110-115.
5. Шабаров А.Б., Саранчин Н.В., Кутрунов В.Н. «Автоматизированный расчет течения нефтегазовой смеси в трубопроводах». Сборник научных трудов «Образование через науку и инновации». Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2005, с. 126-129.
6. Саранчин Н.В. «Методы и алгоритмы расчета газожидкостных систем в трубопроводах» Сборник научных трудов «Теплофизика, гидродинамика, теплотехника». Вып. 3, Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2007

Отпечатано в типографии «Инвест-Д»

Тел.: 8-919-947-41-06

Заказ №01002 – от 25.11.2010 г.

Формат 60x84 1/16. Усл. Печ. Л. 1.

Бумага 80г. Печать цифровой офсет. Тираж 100 экз.