

**ПЕРСПЕКТИВЫ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ  
НА ТРАНСПОРТ УГЛЕВОДОРОДОВ**

**С. М. Дудин, А. Н. Шиповалов, С. Ю. Подорожников, Ю. Д. Земенков**  
(Тюменский государственный нефтегазовый университет)

*Ключевые слова: трубопровод, фазовое состояние, структурные формы течения, газожидкостный поток, объемное газосодержание, гидравлическое сопротивление*

*Key words: pipeline, flow velocity, phase statement, flow structure forms, gas and liquid flow, volume gas content, hydraulic resistance, pressure differential*

Системы трубопроводного транспорта углеводородного сырья (УВС) России являются развитыми с позиций осуществления технологического процесса и с позиций безопасности процесса перекачки углеводородов по трубам.

Повышенное внимание к экологической и промышленной безопасности транспорта углеводородов со стороны надзорных организаций диктует необходимость совершенствования систем контроля и управления процессом перекачки. Мероприятия по обеспечению эксплуатационной надежности и эффективности трубопроводных систем сориентированы на применение современных технологий для восстановления и ремонта трубопроводов. Развитие систем мониторинга режимов перекачки направлено на решение задач обнаружения и прогнозирования утечек транспортируемого продукта.

Вместе с этим в Российской Федерации действует ряд правительственных программ и распоряжений федерального и регионального уровней, сориентированных на повышение энергоэффективности промышленных объектов в нефтегазовом комплексе страны.

- Энергетическая стратегия России на период до 2030 г.
- Федеральный закон Российской Федерации № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» от 23.11.2009.
- Распоряжение Правительства РФ от 27 августа 2005 г. № 1314-р о «Концепции мониторинга потенциально опасных объектов инфраструктуры РФ».
- Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 годы» распоряжение Правительства Российской Федерации от 6 июля 2006 г. № 977-р.
- Долгосрочная целевая программа «Основные направления развития минерально-сырьевого и топливно-энергетического комплексов 2010-2012 гг.» распоряжение Правительства Тюменской области №1275-рп, 31.08.09. и др.

Поэтому приоритетным направлением в развитии систем трубопроводного транспорта углеводородов является разработка и совершенствование энергосберегающих технологий для предприятий ТЭК. Одним из наиболее перспективных инструментов в области снижения энергетических затрат на трубопроводный транспорт энергоресурсов могут стать системы мониторинга технологических процессов в нефтегазовой отрасли.

В настоящее время характерной особенностью эксплуатации трубопроводов является работа в режимах существенной недогрузки объектов трубопроводного транспорта углеводородного сырья, при давлениях ниже проектных. Особое значение это имеет для трубопроводов, транспортирующих газонасыщенные и нестабильные среды, а также на участках трубопровода, где возникают условия для проявления эффектов многофазности продукта и нестационарности режима течения. Неблагоприятные эффекты многофазности потока проявляются при испарении газового конденсата, изменении в потоке концентрации парафинов, солей, смол, изменении объемной доли газа в потоке газонасыщенной нефти и др. Нестационарность процесса перекачки наблюдается при реализации режима запуска (остановки), на переходных режимах работы трубопровода, а также на аварийных режимах.

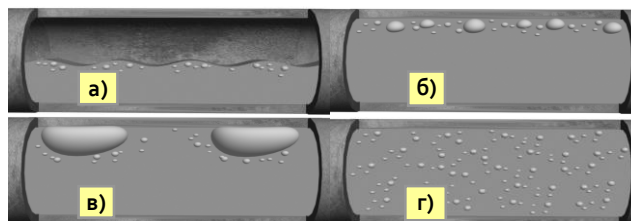
В связи с указанными особенностями эксплуатации возникает необходимость осуществлять своевременную оценку гидродинамического состояния перекачиваемого продукта в трубопроводе для оптимизации энергетических затрат на его транспорт.

Решение поставленной задачи возможно применением систем мониторинга гидродинамических характеристик транспортируемой среды. В основу всех систем, предназначенных для наблюдения, контроля и управления параметрами исследуемого процесса заложен принцип, который формулируется «информация о состоянии контролируемого процесса обрабатывается для использования моделью этого процесса в режиме реального времени». Методы сбора и передачи информации достаточно легко реализуются с помощью технических средств телемеханики. В качестве моделей, характеризующих исследуемый процесс, применяются, в основном, математические модели, которые позволяют наиболее точно описать изучаемый процесс. Использование высокочастотных ЭВМ и непосредственное участие оператора позволяют осуществлять непрерывный контроль и управление параметрами исследуемого процесса в режиме реального времени.

В разное время вопросами математического моделирования течения УВС в трубопроводах занимались многие исследователи: Н. А. Слезкин, С. Г. Телетов, С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович, Х. А. Рахматуллин, А. Н. Крайко, Л. Е. Стернин, А. К. Дюнин, Ю. Т. Борщевский, А. И. Гужов, В. Ф. Медведев, Р. И. Нигматулин, Н. А. Яковлев, М. А. Гусейнзаде, А. Б. Шабаров, Ю. С. Даниэлян, В. А. Юфин, В. Н. Антипов, А. Б. Шабаров, В. А. Зысин, Э. Л. Китанин, А. К. Галлямов, С. Е. Кутоков, Г. Уоллис и др.

К настоящему времени многими авторами разработан ряд моделей течения углеводородных жидкостей в трубопроводах с использованием классических положений теории механики сплошных сред. Различия заключаются в количестве и качестве учитываемых условий и особенностей трубопроводного транспорта углеводородов.

Большинство публикаций, посвященных трубопроводному транспорту многофазных углеводородов, раскрывают вопросы транспорта двухфазных углеводородных систем, где особое внимание уделяется режимам течения газонасыщенных и газожидкостных смесей с выделением в структуре потока газовой и жидкой фаз. Например, в работах [1, 2, 3, 4] для горизонтальных потоков авторами описываются и выделяются следующие структурные формы течения газожидкостной смеси (рис. 1).



**Рис. 1. Структурные формы газожидкостного потока:**  
*а – раздельная; б – пузырьковая; в – пробковая; г – эмульсионная*

В промышленных трубопроводах [3], наиболее распространенными структурными формами потока являются пробковая и эмульсионная. Между отдельными формами течения газожидкостных смесей нет четких границ раздела, а имеются сравнительно широкие переходные зоны по скорости и газосодержанию.

Характерной особенностью режимов течения двухфазных углеводородных сред является пульсация давления, например, в случае трубопроводного транспорта газожидкостных смесей. Пульсация давления в трубопроводе приводит к нарушению нормального режима работы перекачивающего оборудования, контрольно-измерительных приборов и т.д. [1].

При перекачке многофазных смесей типа газ-нефть-вода, состоящей из двух взаимно нерастворимых жидких фаз – нефти и воды, также возникают трудности из-за образования эмульсий в процессе их движения по трубам. Кроме того, в реальных условиях эксплуатации трубопроводов, проложенных по пересеченной местности, на газожидкостный поток вместе с силами трения действуют силы гравитации. В результате чего, жидкая фаза аккумулируется на восходящих участках, а газовая – на нисходящих участках трассы трубопровода. Например, в процессе эксплуатации трубопроводных систем возникают осложнения (рис. 2), связанные с уменьшением проходного сечения или полной закупоркой труб, вызванных образованием устойчивых газовых пробок и скоплений жидкости (воды или конденсата).

В нефтях, перекачиваемых по магистральным и промысловым нефтепроводам, почти всегда содержатся растворенные нефтяные газы, которые могут аккумулироваться в локальные скопления газа, выделяющегося из жидкости при понижении давления. Помимо этого в нефтепроводах возможно образование водяных пробок, связанных с перекачкой обводненных нефтей. Скопления воды и газа уменьшают рабочее сечение труб, увеличивают их гидравлическое сопротивление [5]. Аналогичные трудности возникают и при трубопроводном транспорте нестабильных жидкостей (ШФЛУ, нестабильный конденсат, сжиженный газ) особенно в зимнее время или в пусковой период.



**Рис. 2. Эксплуатационные осложнения, возникающие при транспорте гетерогенных сред**

Отдельно необходимо отметить негативное влияние гидратов на технологические процессы в вертикальных трубах. Такие процессы характерны для скважин, эксплуатируемых на подземных хранилищах газа.

Особенно остро данная проблема проявляется в условиях Крайнего Севера, когда низкие пластовые температуры и суровые климатические условия создают благоприятные условия для гидратообразования в скважинах и наземных коммуникациях: устьевой арматуре, шлейфовых трубопроводах. Несвоевременная ликвидация образовавшихся гидратов может привести к серьезным последствиям – полной остановке скважины и выведением её из технологического процесса.

Наличие эксплуатационных осложнений в трубопроводах приводит к повышению гидравлического сопротивления, гидростатического перепада давления и не редко к полной закупорке поперечного сечения трубопровода (образование локальных скоплений газа, водяных пробок и кристаллогидратов).

Устойчивость эксплуатационных осложнений в первую очередь обусловлена термобарическими условиями течения углеводородов в трубе, а также компонентным составом углеводородной системы и геометрической формы трубопровода.

Известно, что затраты мощности на перекачку единицы массы углеводородного сырья (УВС) в виде газа на 2 - 3 порядка превышают затраты мощности на перекачку УВС в виде жидкости. Поэтому для вопросов энергосбережения при

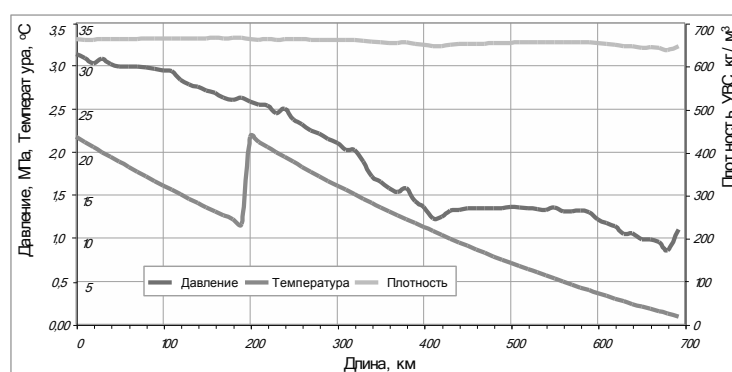
транспорте УВС важной задачей является разработка и использование при проектировании и эксплуатации метода расчета течения и тепломассопереноса газожидкостных углеводородных сред в промысловых и магистральных трубопроводах.

На кафедре «Транспорт углеводородных ресурсов» ТюмГНГУ в течение последнего десятилетия ведутся исследования в области мониторинга технологических процессов в системах трубопроводного транспорта энергоресурсов.

К настоящему времени разработан ряд физико-математических моделей, описывающих процессы транспорта и хранения УВС на объектах нефтегазовой промышленности.

Последней разработкой авторского коллектива является физико-математическая модель течения газожидкостной смеси в конденсатопроводе, которая позволяет выполнять оперативный анализ гидродинамического состояния конденсата в трубопроводе. Подробное описание системы уравнений и замыкающих соотношений приведено в работе [6].

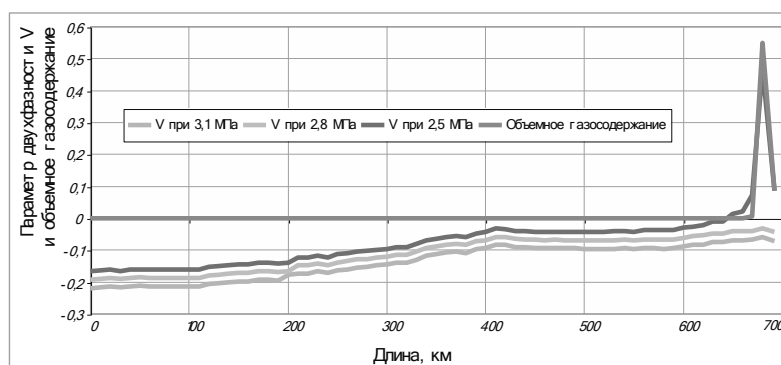
Разработанная физико-математическая модель течения УВС в трубопроводе, учитывающая изменение компонентного состава жидкой и газовой фаз, позволила провести расчетно-параметрическое исследование теплофизических параметров нефтеконденсатной смеси в различных сечениях продуктопровода (на примере конденсатопровода Уренгой-Сургут). Представлены результаты расчетов параметров УВС вдоль трассы трубопровода (рис. 3). Из сопоставления расчетных и реально наблюдаемых перепадов давления и температуры, можно сделать вывод об адекватности выбранной расчетной физико-математической модели конденсатопровода (относительное отклонение рассчитанного перепада давления от реально наблюдаемого составляет 4,6% и отклонение расчетного изменения температуры от экспериментального составило 1,5%).



**Рис. 3. Параметры УВС вдоль трассы конденсатопровода**

Представлено расчетно-параметрическое исследование фазового состояния УВС вдоль трассы конденсатопровода, где (рис.4) показано изменение параметра двухфазности  $V$  и истинного объемного газосодержания УВС при снижении рабочего давления перекачки на 0,6 МПа в начале трубопровода.

При снижении рабочего давления перекачки на трассе конденсатопровода (см. рис. 4) могут возникать участки, где УВС переходит в двухфазное газожидкостное состояние (мольная доля паровой фазы принимает значение  $0 < V < 1$  и приобретает определенный физический смысл). В этом случае дальнейший расчет гидродинамических параметров конденсатопровода проводился с учетом двухфазности течения УВС.



**Рис. 4. Изменение параметров фазового состояния УВС вдоль трассы конденсатопровода при различном давлении продукта во входном сечении**

#### Выводы

- Современные трубопроводы работают при давлениях ниже проектных, что создает благоприятные условия для образования и существования эксплуатационных осложнений, которые снижают гидравлическую эффективность нефтегазопроводов.
- Разработаны физико-математическая модель и методика расчета равновесного течения углеводородной смеси в конденсатопроводе с учетом фазовых переходов и изменения компонентного состава фаз, которые могут быть использованы научно-исследовательскими и проектными институтами, промышленными предприятиями при проектировании и эксплуатации трубопроводов, транспортирующих газожидкостные среды.
- Результаты расчетно-теоретического исследования свидетельствуют о том, что при неполной загрузке конденсатопровода по мощности в трубопроводе имеют место участки с двухфазным течением. Поэтому для снижения энергозатрат на транспорт конденсата необходимо обеспечивать однофазный режим течения по всей длине трубопровода.
- Полученная при мониторинге течений УВС в трубопроводах информация может быть интегрирована в алгоритм принятия управленческих решений по регулированию режимами работы трубопроводных систем, что в итоге позволит

снизить энергетические затраты на перекачку при предотвращении образования эксплуатационных осложнений по трассе трубопровода.

#### **Список литературы**

1. Гужов А. И. Совместный сбор и транспорт нефти и газа. – М.: Недра, 1973.
2. Жолобов В. В., Тарновский Е. И. Моделирование течения многокомпонентной углеводородной жидкости в трубопроводах // Известия ТПУ. Серия «Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений». - Томск, том 305, вып. 8, 2002.
3. Сбор, транспорт и хранение природных углеводородных газов: Учебное пособие./Гужов А. И., Титов В. Г., Медведев В. Ф. и др. – М.: Недра, 1978.
4. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа: Учебное пособие для системы дополнительного профессионального образования/ А. А. Коршак, А. М. Нечваль. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2005.
5. Трубопроводный транспорт жидких и газообразных энергоносителей / Яковлев Е. И., Иванов В. А., Клюк Б. А. и др. – М.: ВНИИОЭНГ, 1993.
6. Дудин С. М. Моделирование фазового состава газоконденсата в трубопроводах. / Дудин С. М., Земенков Ю. Д., Шабаров А. Б., Саранчин Н. В.// Известия вузов. Нефть и газ. – Тюмень, - 2010. – №6.
7. Диагностика повреждений и утечек при трубопроводном транспорте многофазных углеводородов. Под общей редакцией Ю. Д. Земенкова. – Тюмень: Вектор Бук, 2002.

#### **Сведения об авторах**

**Дудин С. М.**, ассистент, кафедра «Проектирование и эксплуатация нефтегазопроводов и хранилищ», Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел.:(3452)20-19-31, e-mail:dudin@tsogu.ru

**Шиповалов А. Н.**, начальник Лонг-Юганского ЛПУ; ООО «Газпром трансгаз Югорск»; г. Югорск, тел.: (3499)51-55-10, e-mail: ashipovalov@lyg.ttg.gazprom.ru

**Подорожников С. Ю.**, к. т. н., доцент, кафедра «Транспорт углеводородных ресурсов», Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел.: (3452) 20-19-31, e-mail: usds@tsogu.ru

**Земенков Ю. Д.**, д.т.н., заведующий кафедрой «Проектирование и эксплуатация нефтегазопроводов и хранилищ», Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел.:(3452)20-19-31, e-mail: zemenkov@tsogu.ru

**Dudin S. M.**, postgraduate, Department «Designing and operation of oil and gas pipelines and storages» Tyumen State Oil and Gas University, phone :(3452)20-19-31, e-mail:dudin@tsogu.ru

**Shipovalov A. N.**, Long-Yugan pipeline management board chief; «Gazprom Transgaz Yugorsk Ltd.»Yugorsk city

**Podoroghnikov S. Yu.**, PhD, associate professor, Hydrocarbon resources transportation department, Tyumen State Oil and Gas University

**Zemenkov Yu. D.**, Doctor of Technical Sciences, Head of Department «Designing and operation of oil and gas pipelines and storages»Tyumen State Oil and Gas University, phone: (3452) 20-19-31