

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ В ТРУБОПРОВОДАХ

Дудин С.М.<sup>1</sup>, Земенкова М.Ю.<sup>1</sup>, Подорожников С.Ю.<sup>1</sup>, Шиповалов А.Н.<sup>2</sup>,  
Сероштанов И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: srg\_work@mail.ru

<sup>2</sup>ООО «Газпром трансгаз Югорск», Югорск, Россия (628260, Югорск, ул. Мира, 15), e-mail: ashipovalov@lyg.ttg.gazprom.ru,

---

Экспериментальным исследованиям гетерогенных сред в трубопроводах посвящены работы ученых ВНИИгаз, Гипровостокнефть, Куйбышев НИИ НП, Грозненского нефтяного института и др. В объективном рассмотрении полученные эмпирические зависимости и методики расчета трубопроводов, транспортирующих многофазные продукты, представляют собой банк экспериментальных данных по проблеме трубопроводного транспорта многофазных систем. На основе анализа опубликованных работ были сформулированы основные конструктивные требования к экспериментальным установкам, предназначенным для изучения режимов течения газожидкостных потоков в трубопроводах, которые учтены автором при создании экспериментального стенда. В статье описываются результаты экспериментальных исследований режимов течения газожидкостной смеси в трубопроводе, а также приводится методологическое описание экспериментальной установки. Также в статье описано, разработанное при участии авторов, программное обеспечение экспериментального научно-учебного стенда.

---

Ключевые слова: экспериментальная установка, трубопровод, газожидкостный поток, режим течения, гидравлическое сопротивление, потери давления, газонасыщенность.

## EXPERIMENTAL STUDY OF GAS-LIQUID FLOWS IN PIPELINES

<sup>1</sup>Dudin S.M., <sup>1</sup>Zemenkova M.Y., <sup>1</sup>Podorozhnikov S.Y., <sup>2</sup>Shipovalov A.N.,  
<sup>2</sup>Seroshtanov I.V.

<sup>1</sup>FGBO of higher education "Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia, (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38), e-mail: srg\_work@mail.ru

<sup>2</sup>Limited Liability Company "Gazprom transgaz Yugorsk", Yugorsk, Russia (628260, Yugorsk, Mira St., 15), e-mail: ashipovalov@lyg.ttg.gazprom.ru

---

To pilot studies of heterogeneous environments in pipelines works of scientists VNIIGAZ, Giprovostokneft, Kuibyshev are devoted to NIINP, the Grozny oil institute, etc. In objective consideration the received empirical dependences and method of calculation of the pipelines transporting multiphase products represent bank of experimental data on a problem of pipeline transport of multiphase systems. On the basis of the analysis of the published works the main constructive requirements to the experimental installations intended for studying of the modes of a current of gas-liquid streams in pipelines which are considered by the author at creation of the experimental stand were formulated. In article results of pilot studies of the modes of a current of gas-liquid mix in the pipeline are described, and also the methodological description of experimental installation is provided. Also in article it is described, developed with the assistance of authors, the software of the experimental scientific and educational stand.

---

Keywords: experimental installation, pipeline, gas-liquid stream, current mode, hydraulic resistance, losses of pressure, gas saturation.

В разное время вопросами моделирования течений углеводородного сырья в трубопроводах занимались многие исследователи, среди которых 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. Антипьев, А.Б. Шабаров, В.А. Зысин, Э.Л. Китанин, А.К. Галлямов, Кутуков С.Е., 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.

Общими предпосылками в моделировании течений гетерогенных сред по трубопроводам является следующее [1, 5, 8 и др.].

1. При движении углеводородных сред по трубопроводам различают однородные среды, гомогенные смеси и многофазные (гетерогенные) среды. Модель однородной среды применяют, когда доля примесей пренебрежимо мала, по сравнению с долей основной несущей жидкости или газа. В гомогенных смесях составляющие перемешаны на молекулярном уровне. В гетерогенных смесях имеются изолированные неоднородности: капли, пузырьки газа, твердые частицы и т.д. Наиболее изученными являются однородные среды, гомогенные смеси и двухфазные (дисперсные) смеси. Двухфазные потоки представляют собой частный случай гетерогенной среды, математическое описание которой возможно производить на базе многоскоростных континуумов. При этом каждая фаза, заполняя часть общего объема смеси, характеризуется в данной точке истинной плотностью фазы, скоростью, температурой и энтальпией.

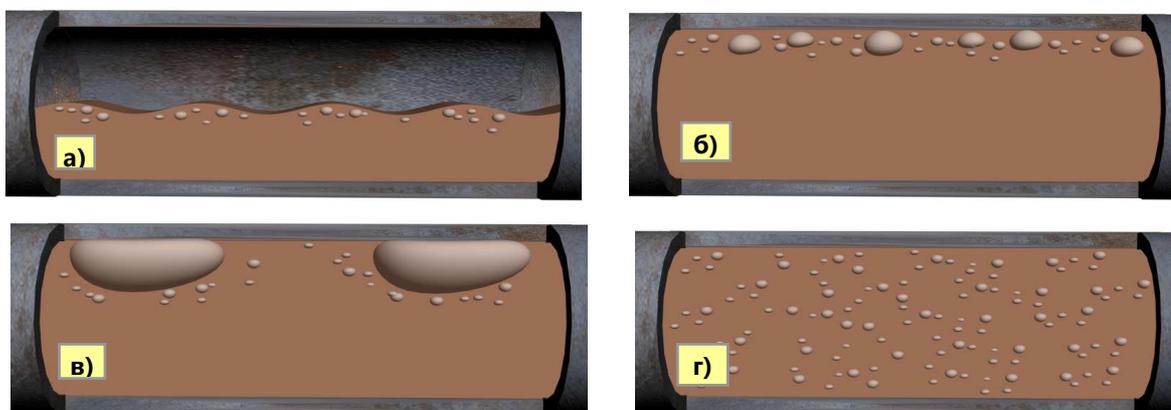
2. При математическом моделировании гетерогенных смесей обычно делается три основных допущения. Первое допущение заключается в том, что размеры неоднородностей (диаметры частиц, капель или их конгломератов и т.п.) гораздо больше, чем характерные расстояния между молекулами. Это допущение позволяет использовать подходы, принятые в механике сплошных сред при описании процессов вблизи поверхности неоднородных включений. Второе допущение заключается в том, что размеры неоднородностей во много раз меньше диаметра и линейный размер трубопровода. Это допущение позволяет корректно проводить осреднение параметров и использовать уравнения механики сплошной среды для осредненных величин. При формализации задачи принимается третье допущение о сплошности среды, позволяющее значительно упростить задачу и представить поток в виде непрерывной жидкой и газовой фаз. Благодаря этому для исследований можно использовать аппарат непрерывных функций и дифференциального исчисления.

3. Наличие в потоке фазовых превращений и использование двухскоростной модели приводит к необходимости учитывать изменение массы и импульса каждой из фаз с помощью уравнений сохранения массы и количества движения для каждой из фаз в отдельности, а также учитывать кинетику процесса образования двухфазного потока, т.е. фазовых превращений.

В Тюменском регионе основой для развития вопросов физико-математического моделирования технологических процессов в нефтегазовой отрасли служит обобщенная модель квазиодномерного течения многофазных углеводородов в трубопроводах, разработанная профессором Шабаровым А.Б. Физико-математическая модель течения многофазных углеводородных сред в трубопроводных системах, суть, которой следующая.

В основу модели положен принцип построения квазиодномерной модели, т.е. одномерной модели течения среды, в которой тем или иным способом приближенно учитываются свойства реального трехмерного течения. При таком подходе к описанию движения жидкости, основные параметры потока, переменные по поперечному сечению канала, заменяются на некоторые постоянные по всему сечению в фиксированный момент времени. При осреднении неравномерный поток в произвольном сечении заменяется каноническим потоком, часть параметров которого может отличаться от реального течения. Канонический поток характеризуется определенным набором постоянных осредненных параметров, при котором сохраняются все свойства реального неравномерного потока.

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.



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

Известно, что при данных конкретных условиях эксплуатации трубопроводов углеводородные среды могут находиться в жидком, газообразном или в двухфазном газожидкостном состояниях. Для углеводородов, взятых в чистом виде, граничным давлением между газообразным и жидким состояниями при данной температуре является давление их упругости паров. При давлении упругости паров происходит полный переход рассматриваемого углеводорода из одной фазы в другую [3].

При трубопроводном транспорте углеводородных сред переход из одного состояния в другое происходит при изменении давления и температуры, что вызывает процессы испарения или конденсации. На практике движении углеводородных сред по трубопроводам обычно сопровождается процессами испарения углеводородов, протекающими под влиянием снижения давления при относительно постоянной температуре.

В промышленных трубопроводах наиболее распространенными структурными формами потока являются пробковая и эмульсионная.

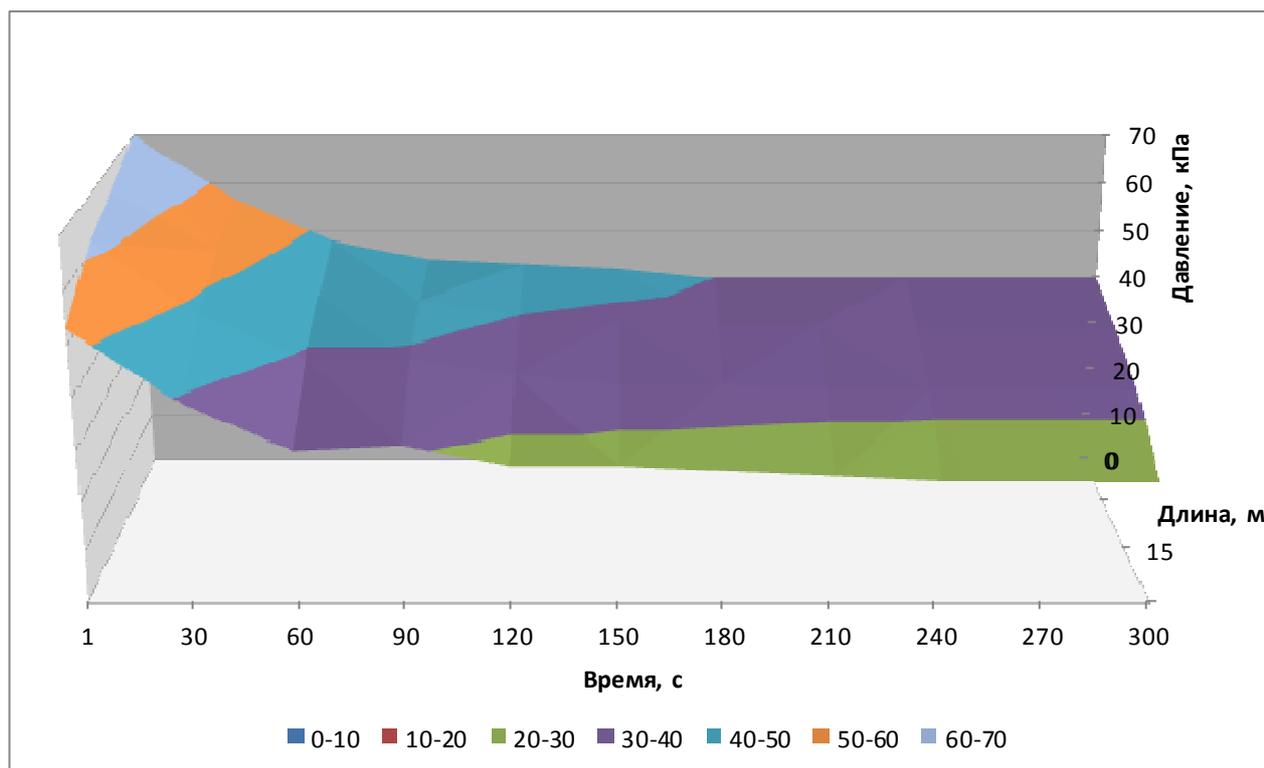
В отличие от аналитического метода исследований закономерностей и описания режимов течения газожидкостных смесей по трубопроводам, экспериментальным исследованиям посвящено не так много работ. В первую очередь это связано с тем, что движение двухфазных газожидкостных систем в трубах, осложненное массообменными процессами и другими факторами, в лабораторных условиях моделируется достаточно сложно [4]. Однако известны исследования ВНИИгаз, Гипростокнефть, Куйбышев НИИ НП, Грозненского нефтяного института и др., которыми на основе полученных данных разработаны методики расчета трубопроводов транспортирующих многофазные продукты. Разработанные методики отличаются количеством фиксируемых и изменяющихся величин и в объективном рассмотрении они представляют собой банк экспериментальных данных по проблеме трубопроводного транспорта многофазных систем.

На кафедре «Транспорт углеводородных ресурсов» ТюмГНГУ разработан научно-исследовательский экспериментальный стенд, общий вид которого представлен на рис. 2. Данный стенд позволяет моделировать течение газожидкостного потока в трубопроводе и представляет собой замкнутый гидравлический контур, состоящий из трех последовательно соединенных участков со стеклянной трубкой-вставкой для визуализации структурных форм течения.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с методикой предварительного планирования и проведения эксперимента, согласно которой в опытах имитировались условия, характеризующиеся разными режимами, величиной гидравлического сопротивления и физико-химическими свойствами перекачиваемого продукта.



*Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки*



*Рис. 3. Изменение давления газонасыщенного потока при пробковом режиме течения*

На первом этапе исследований осуществлялось измерение параметров однофазного потока, а на втором – газонасыщенной жидкости. В качестве рабочего тела использовались вода и водоглицериновая смесь, насыщенные углекислым газом. В соответствии с методикой проведения эксперимента было выполнено в общей сложности 51 серия измерений в среднем

порядка 40 измерений в каждой, в которых исследовано четыре газожидкостных системы с вязкостью жидкого компонента от 1,13 сСт до 3,38 сСт и плотностью от 998 кг/м<sup>3</sup> до 1098 кг/м<sup>3</sup>. Опыты проводились в диапазоне изменения газонасыщенности от 0,54 до 0,97.

По результатам исследований построены экспериментальные графики изменения основных гидродинамических параметров газожидкостных смесей и получены эмпирические зависимости. На рис. 3 приведены экспериментальные данные по исследованию режимов течения двухфазной двухкомпонентной системы. На рис. 4 представлены экспериментальные данные по структурным формам течения газожидкостного потока.



*Рис. 4. Структурные формы течения газожидкостных сред, отмеченные при экспериментальном исследовании течения двухфазного потока в трубопроводе: а – пробковая; б – эмульсионная (вспененная)*

Для выполнения измерений первичной информации и обработки экспериментальных данных разработано специальное программное обеспечение на ЭВМ. Данный продукт разработан в среде Visual Basic, в который включены следующие функциональные блоки:

- измерительный блок, который функционирует посредством реализованной в экспериментальной установке системы сбора и обработки данных;
- блок теоретической информации содержит описание экспериментальной установки и электронные версии учебных пособий по направлению исследований;
- мультимедийный блок, в котором заложены кадры видеосъемки различных режимов течения газожидкостных смесей в трубопроводах, а также видеоролики режимов течения, созданные в программе 3D-Max Studio;
- расчетно-аналитический блок позволяет выполнять оперативные расчеты параметров течения газожидкостного потока в трубопроводе в режиме реального времени.

Разработанное программное обеспечение позволяет выполнять задачи, связанные с научными исследованиями по направлению анализа гидродинамических и тепловых режимов работы трубопроводов, а также задачи учебного процесса при проведении лабораторных занятий по направлению подготовки специалистов нефтегазового профиля.

**Выводы:**

- 1) Разработан научно-исследовательский стенд позволяющий имитировать и изучать режимы течения гетерогенных сред в горизонтальных трубопроводах. Созданный научно-исследовательский лабораторный стенд и полученные с его использованием экспериментальные данные используются в учебном процессе ТюмГНГУ для проведения занятий при подготовке магистров направления 21.04.01 «Нефтегазовое дело» по программам «Энергоресурсосберегающие технологии транспорта и хранения углеводородов» и «Трубопроводный транспорт углеводородов».
- 2) Создано специальное авторское программное обеспечение для измерения и обработки первичной экспериментальной информации.
- 3) Результаты экспериментальных исследований и полученные эмпирические зависимости гидродинамических характеристик двухфазных потоков могут использоваться при анализе течений гетерогенных сред в трубопроводах, в частности, при изучении пробкового и эмульсионного режимов течения.

#### **Список литературы**

1. Антипов В.Н., Земенков Ю.Д., Шабаров А.Б. и др. Техническая и параметрическая диагностика в трубопроводных системах. Тюмень: Вектор Бук, 2002.- с. 432.
2. Антипов В.Н., Неволин А.П., Земенков Ю.Д. Работа промежуточных насосных станций при перекачке газонасыщенных нефтей//Нефтяное хозяйство.-1981.- №10.- с.46-48.
3. Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах. Мамаев В.А., Одишария Г.Э., Семенов Н.И., Точилин А.А. М.: Недра, 1969. – 208 с.
4. Гужов А.И. Совместный сбор и транспорт нефти и газа. – М.: Недра, 1973. – 280 с.
5. Диагностика повреждений и утечек при трубопроводном транспорте многофазных углеводородов. Под общей редакцией Ю.Д. Земенкова. – Тюмень: Издательство «Вектор Бук», 2002. – 432 с.
6. Дудин С.М. Проблемы трубопроводного транспорта газонасыщенных и газожидкостных смесей. /Дудин С.М., Земенков Ю.Д., Трясцин Р.А./ Интерстроймех – 2005: Труды международной научно-технической конференции. Часть.1 – Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. – с. 76-79.
7. Дудин С.М. Исследование газожидкостных течений в трубах. / Дудин С.М., Земенков Ю.Д., Шабаров А.Б./ Нефть и газ: Западной Сибири: Материалы международной научно-технической конференции. Т. 1. – Тюмень: «Феликс», 2005. – с. 162.
8. Дудин С.М. Исследование режимов течения гетерогенных сред в горизонтальных трубопроводах. / С.М. Дудин, Ю.Д. Земенков, С.Ю. Подорожников// Проблемы топливно-

энергетического комплекса Западной Сибири. Сборник научных трудов Тюменского отделения РАН. – Тюмень, 2009. – с. 327-334.

9. Техника и технологические процессы при транспорте энергоресурсов: Учебное пособие в 2-х томах. Под общей редакцией Ю.Д.Земенкова. -Тюмень: Изд. «Вектор Бук». -2008. -т.1. - 380 с.

10. Транспорт и хранение нефти и газа в примерах и задачах: учеб. пособие/Под общ. ред. Ю.Д. Земенкова. -СПб.: Недра, 2004. - 544 с.

**Рецензенты:**

Соколов С.М., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;

Торопов С.Ю., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дудин Сергей Михайлович, ассистент кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», 89088738406 адрес для переписки: srghome@mail.ru

Земенкова Мария Юрьевна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», 89199433533 адрес для переписки: muzemenkova@mail.ru

Подорожников Сергей Юрьевич – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», тел.: 83452283053, адрес для переписки: zemenkov@tsogu.ru

Шиповалов Антон Николаевич – начальник Лонг-Юганского ЛПУ МГ ООО «Газпром трансгаз Югорск», тел.: 8(3499) 51-55-10, адрес для переписки: ashipovalov@lyg.ttg.gazprom.ru

Сероштанов Иванов Владимирович – инженер ООО «Газпром трансгаз Югорск», тел.: 8(3499) 51-55-10, адрес для переписки: zemenkov@tsogu.ru