

УДК 532.542:51-74

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ В ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

¹Дудин С.М., ²Шиповалов А.Н., ¹Новицкий Д.В.

¹ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, e-mail: srg_work@mail.ru;

²ООО «Газпром трансгаз Югорск», Югорск, e-mail: ashipovalov@lyg.ttg.gazprom.ru

В настоящее время 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. На современном этапе развития науки и техники такие системы мониторинга позволяют отслеживать, изменять и прогнозировать состояние контролируемого объекта в режиме реального времени. Качественное функционирование таких систем обеспечивается современным математическим аппаратом и корректным наполнением исходной информацией. В статье показаны основные аспекты и факторы, которые необходимо учитывать при описании гидродинамического состояния углеводородных сред в трубопроводах, а также рассмотрены математические модели течения газожидкостных смесей в трубопроводах.

Ключевые слова: математическая модель, газожидкостная смесь, режим течения, трубопровод

MATHEMATICAL MODELLING OF HYDRODYNAMICS GAS-LIQUID MIXES IN PIPELINE SYSTEMS

¹Dudin S.M., ²Shipovalov A.N., ¹Novitskiy D.V.

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, e-mail: srg_work@mail.ru;

²Limited Liability Company «Gazprom transgaz Yugorsk», Yugorsk,
e-mail: ashipovalov@lyg.ttg.gazprom.ru

Now the priority direction in development of systems of a pipeline service of hydrocarbons is development and enhancement of energy-saving technologies for the entities of energy industry. Systems of monitoring of engineering procedures in an oil and gas industry can become one of the most perspective tools in the field of decrease in energy costs for a pipeline service of energy resources. At the present stage of development of science and technology such systems of monitoring allow to track, change and predict a condition of a controlled object in real time. High-quality functioning of such systems is provided with a modern mathematical apparatus and correct filling by initial information. The main aspects and factors which need to be considered in case of the description of a hydrodynamic condition of hydrocarbonic environments in pipelines are shown in article, and also mathematical models of a current of gas-liquid mixes in pipelines are considered.

Keywords: mathematical model, gas-liquid mix, current mode, pipeline

Системы трубопроводного транспорта углеводородного сырья (УВС) России являются развитыми как с позиций осуществления технологического процесса, так 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 [3, 6].

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 федеральной системы мониторинга критически важных объектов и (или) потенциально опасных объектов инфраструктуры Российской Федерации и опасных грузов»;

– Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (утв. постановлением Правительства РФ от 21 мая 2013 г. № 426);

– Долгосрочная целевая программа «Основные направления развития минерально-сырьевого и топливно-энергетического комплексов Тюменской области» (распоряжение Правительства Тюменской области от 28 декабря 2012 г. № 2865-рп) 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 [6].

В настоящее время, характерной особенностью эксплуатации трубопроводов является работа в режимах существующей недогрузки объектов трубопроводного транспорта углеводородного сырья, при давлениях ниже проектных. Особое значение это имеет для трубопроводов, транспортирующих газонасыщенные и нестабильные среды, а также для участков 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 [3, 4, 6].

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 так: «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, 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. Антипов, А.Б. Шабаров, В.А. Зысин, Э.Л. Китанин, А.К. Галлямов, С.Е. Кутуков, 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 учитываемых условий и особенностей трубопроводного транспорта углеводородов.

Большинство публикаций, посвященных трубопроводному транспорту многофазных углеводородов, касаются вопросов транспорта двухфазных углеводородных систем, где особое внимание уделяется режимам течения газонасыщенных и газожидкостных смесей с выделением в структуре потока газовой и жидкой фаз [6].

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

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. Так, 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).

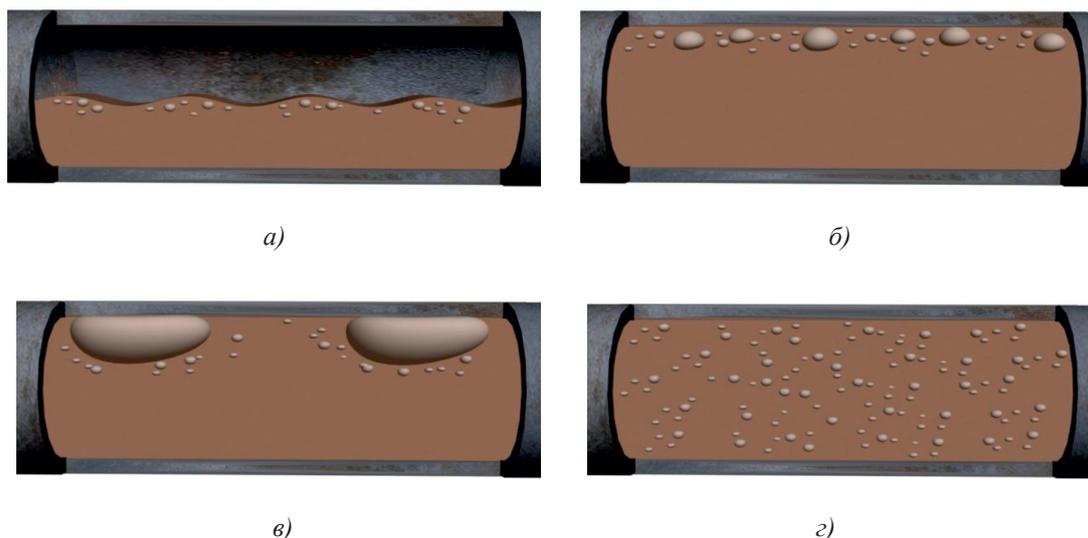


Рис. 1. Структурные формы газожидкостного потока:
 а – раздельная; б – пузырьковая; в – пробковая; з – эмульсионная

Исходя из вышеизложенного, можно констатировать, что наличие эксплуатационных осложнений в трубопроводах приводит к повышению гидравлического сопротивления, гидростатического перепада давления и нередко 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 формой трубопровода.

Процесс построения моделей объекта исследований представляет собой достаточно сложную процедуру, сопряженную с корректным изложением предпосылок и природы моделируемого явления, а в случае трубопроводного транспорта углеводородных сред еще и многофакторную задачу с точки зрения целей и назначения строящейся модели. В связи с этим в каждом конкретном случае применения методов моделирования должны быть аргументированы задачи модели и обозначены рамки её использования.

На основе анализа литературных данных можно условно выделить два направления использования методов и средств моделирования в нефтегазовой отрасли. Первое заключается в исследовании поведения, прогнозирования состояния в будущем и оптимизации режимов работы трубопроводной системы как комплекса взаимосвя-

занных технических средств и объектов. Второе сводится к описанию процессов, происходящих внутри трубопроводной системы и, прежде всего, режимов течения углеводородов по трубам. При этом существует и взаимосвязь данных направлений, которая заключается в общих классификационных признаках (рис. 3) [4, 7].

Примером совокупности этих направлений является исследование гидродинамических и тепловых процессов при движении нефти в объектах нефтеперекачивающих станций (НПС), а также процессов тепломассопереноса при образовании нефтяных донных осадков в вертикальных стальных резервуарах НПС. Моделирование данных процессов подразумевает как анализ технических средств и объектов трубопроводной системы, так и исследование процессов происходящих внутри нефтяных резервуарах, особенно при эксплуатации в условиях Крайнего Севера.

В настоящее время практически отсутствуют какие-либо обстоятельные методики расчета параметров гидродинамического состояния при транспорте многофазных углеводородов. Однако в последние годы данная ситуация стала коренным образом изменяться в направлении получения более или менее корректных расчетных моделей и методик. Причем особенность данного развития, прежде всего, заключается в разработке моделей и методик предназначенных для определения параметров течения двухфазных газожидкостных смесей в трубопроводах.



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

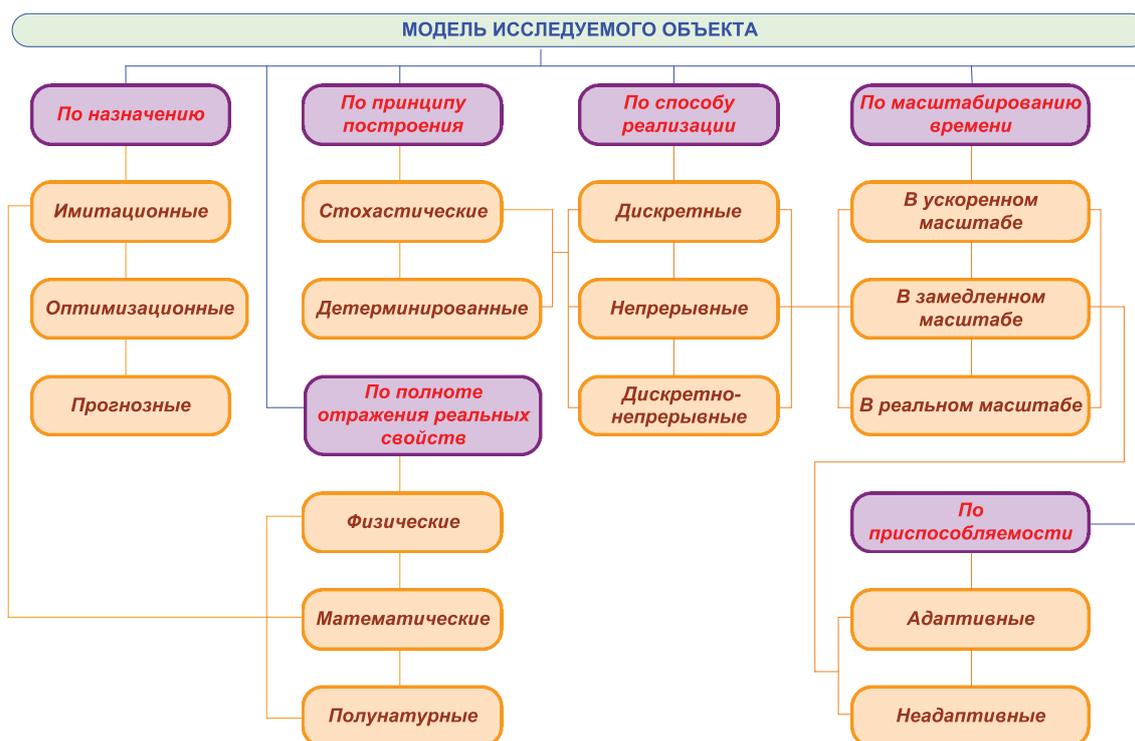


Рис. 3. Классификация моделей, описывающих состояния исследуемого объекта

Анализ расчетных моделей и методик расчета параметров течения двухфазных потоков показал, что по сути своей они отличаются лишь количеством учитываемых факторов, дополняя друг друга. Но при этом ни одна из них не учитывает всех ха-

рактерных особенностей эксплуатации трубопроводных систем, таких как проявления эффектов многофазности перекачиваемого продукта и нестационарности течения.

В последнее время в литературе достаточно часто встречается понятие «фи-

зико-математической модели», которое толкуется следующим образом. Физико-математическая модель – это модель процесса или явления в, основу которой положены современные достижения, как в области физики гидродинамических процессов, так и в сфере математического описания данных процессов [4].

В Тюменском регионе основой для развития вопросов физико-математического моделирования технологических процессов в нефтегазовой отрасли стала обобщенная модель квазиодномерного течения многофазных углеводородов в трубопроводах, разработанная профессором А.Б. Шабаровым 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.

На кафедре «Транспорт углеводородных ресурсов» ТИУ ведутся исследования в области мониторинга технологических процессов в системах трубопроводного транспорта энергоресурсов. Авторами разработана физико-математическая модель течения газожидкостной смеси в конденсаторопроводе, которая позволяет выполнять

оперативный анализ гидродинамического состояния конденсата в трубопроводе [1, 2].

Для расчета теплофизических свойств газожидкостной смеси в трубопроводе используется метод контрольных объемов. 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 Δz друг от друга (рис. 4). Применительно к контрольному объему используются балансовые уравнения: массы, количества движения, а также баланса полной энергии. Основные балансовые уравнения сохранения массы, импульса и энергии при квазиодномерном течении записываем в форме предложенной профессором А.Б. Шабаровым.

На основе разработанной модели получена расчетная методика, с помощью которой выполнен анализ гидродинамического состояния и компонентный состав углеводородной смеси в каждом i -ом сечении трубопровода при изменении термобарических и гидравлических условий. Разработанная методика апробирована применительно к углеводородной смеси деэтанализованного конденсата с нефтью, транспортируемой с северных газоконденсаторнефтяных месторождений по конденсаторопроводу на перерабатывающий завод [5].

Выводы

1. В настоящее время различными отечественными и зарубежными авторами предложен ряд математических моделей течения углеводородных жидкостей в трубопроводных системах, разработанных с использованием классических положений теории механики сплошных сред. Принципиальные различия содержатся в количестве учитываемых условий и особенностей трубопроводного транспорта углеводородного сырья.

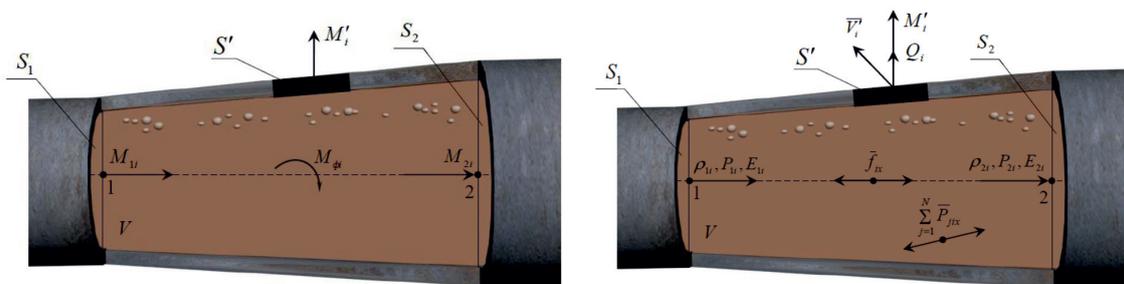


Рис. 4. К балансу i -ой фазы масс, импульсов и энергии i -ой фазы в контрольном объеме V

2. На современном этапе развития методов математического моделирования технологических процессов в системах трубопроводного транспорта углеводородов перспективным направлением является разработка физико-математических моделей, позволяющих корректно и точно описывать сложные гидродинамические процессы при транспорте многокомпонентных углеводородных сред в реальных промышленных условиях.

3. На основе разработанной физико-математической модели равновесного течения углеводородной смеси в конденсатопроводе составлены методика и алгоритм расчета, позволяющие определить компонентный состав фаз в произвольных сечениях трубопровода и найти допустимые значения массовых концентраций легких фракций углеводородов во входном сечении трубопровода из условия обеспечения однофазного режима течения по всей его длине.

Список литературы

1. Моделирование фазового состава газоконденсата в трубопроводах. / Дудин С.М., Земенков Ю.Д., Шабаров А.Б., Саранчин Н.В. // Известия вузов. Нефть и газ. – Тюмень: изд-во ТюмГНГУ, 2010. – № 6. – С. 63–68.
2. Методика и результаты анализа гидродинамического состояния углеводородной смеси в конденсатопроводе. / Дудин С.М., Земенков Ю.Д. // Территория «Нефтегаз». – Москва: Издательство: ЗАО «Камелот Паблишинг», 2015. – № 11. – С. 88–91.
3. Перспективы снижения энергетических затрат на транспорт углеводородов. / Дудин С.М., Земенков Ю.Д., Шиповалов А.Н., Подорожников С.Ю. // Известия вузов. Нефть и газ. – Тюмень: изд-во ТюмГНГУ, 2011. – № 2 – С. 65–69.
4. Примеры использования методов моделирования при описании режимов течения УВС в трубопроводах. / Дудин С.М., Балин И.В., Шиповалов А.Н. // Проблемы функционирования систем транспорта: Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: в 2 томах. – Тюмень: изд-во ТюмГНГУ, 2015. – С. 214–217.
5. Расчетно-параметрическое исследование углеводородной смеси в конденсатопроводе. / Дудин С.М., Земенков Ю.Д., Шабаров А.Б., Саранчин Н.В. // Трубопроводный транспорт [теория и практика]. – Москва: ВНИИСТ, 2010. – № 5 – С. 42–45.
6. Управление энергоэффективностью: моделирование режимов течения углеводородного сырья в трубопроводах: Монография / Дудин С.М., Земенков Ю.Д., Курушина Е.В., Моисеев Б.В, Аптразаков Р.А., Мухортов А.А. – Тюмень: издательство «Вектор Бук», 2016. – 333 с.
7. Физико-математическое моделирование технологических режимов транспорта и хранения углеводородных сред в трубопроводных системах. / Дудин С.М., Некрасов В.О., Земенков Ю.Д. // Нефть и газ: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) – М.: Издательство «Горная книга». 2013. – С. 53–62.