

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕВОДОРОДНЫХ СРЕД В ТРУБОПРОВОДАХ

Дудин С.М., Земенков Ю.Д.

Тюменский государственный нефтегазовый университет

В работе рассмотрены проблемы трубопроводного транспорта многофазных сред, описаны характерные особенности гидродинамических процессов, приведены общие предпосылки для моделирования движения многофазных систем в трубах, рассмотрена обобщенная физико-математическая модель течения многофазных сред в трубопроводах, описан метод сбора и обработки информации о состоянии процесса перекачки и др.

В настоящее время в условиях снижения объемов перекачки весьма актуальным становится обеспечение эффективного эксплуатационного контроля и управления параметрами режимов действующих трубопроводов, при давлениях ниже проектных. Проблема приобретает особое значение для участков трубопровода, где возникают условия для проявления эффектов многофазности транспортируемой среды и благоприятного существования эксплуатационных осложнений.

Описанием характера образования эксплуатационных осложнений и режимов течения углеводородных сред в трубопроводных системах в разное время занимались многие исследователи, среди которых Слезкин Н.А., Телетов С.Г., Кутателадзе С.С., Стырикович М.А., Рахматуллин Х.А., Крайко А.Н., Стернин Л.Е., Дюнин А.К., Борщевский Ю.Т., Гужов А.И., Медведев В.Ф., Нигматулин Р.И., Яковлев Н.А., Гусейнзаде М.А., Шабаров А.Б., Даниэлян Ю.С., Юфин В.А., Антипьев В.Н., Зысин В.А., Китанин Э.Л., Галлямов А.К., Уоллис Г. и др.

Большинство публикаций, посвященных трубопроводному транспорту многофазных углеводородов, посвящено вопросам транспорта двухфазных углеводородных систем. Так в работах [3, 4, 13, 18 и др.], среди прочих возможных вариантов транспортировки многофазных углеводородных сред, особое внимание уделяется режимам течения газонасыщенных и газожидкостных смесей с выделением в структуре потока газовой и жидкой фаз.

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 [4].

Характерной особенностью режимов течения двухфазных углеводородных сред является пульсация давления, например в случае транспорта газожидкостных смесей. Пульсация давления в трубопроводе приводит к нарушению нормального режима работы перекачивающего оборудования, контрольно-измерительных приборов и т.д. [4].

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, 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 [19]. Аналогичные трудности возникают и при трубопроводном транспорте нестабильных жидкостей, таких как ШФЛУ, нестабильный конденсат, сжиженный газ, особенно в зимнее время или в пусковой период.

При эксплуатации газопроводов наличие влаги в транспортируемом продукте также осложняет нормальный режим их работы, помимо того, что увеличивает сероводородную коррозию она еще и вызывает различные

эксплуатационные осложнения. Пары воды способны конденсироваться, нарушая нормальное движение газа по газопроводу. На горизонтальных и нисходящих участках трассы жидкость движется в виде пленки по стенкам трубы. Наличие жидкой пленки значительно увеличивает гидравлические сопротивления газового потока. Наибольшее количество жидкости скапливается на восходящих участках газопровода, образуя гидравлический затвор, частично или полностью перекрывающий сечение трубы. Помимо этого присутствие в трубопроводе гидратообразователя (газа, конденсата, ШФЛУ) и свободной воды (жидкой воды, льда, воды, диспергированной в объеме газа или жидкого гидратообразователя, пленки воды на поверхности трубопровода и т.д.) при соответствующих температуре и давлении способствует образованию гидратов [18].

Указанные причины приводят к повышению гидравлического сопротивления и гидростатического перепада давления [4 и др.].

Таким образом, очевидно, что существование эксплуатационных осложнений в работе трубопроводов оказывает негативное влияние на их гидродинамические режимы, что особенно актуально в современных условиях эксплуатации объектов трубопроводного транспорта, при давлениях ниже проектных. Поэтому в целях снижения энергетических затрат на транспорт углеводородов необходимо осуществлять эффективный эксплуатационный контроль и управления режимами перекачки, особенно на участках трубопровода, где возникают условия для проявления эффектов многофазности транспортируемой среды и благоприятного существования эксплуатационных осложнений.

Наиболее перспективным направлением в решении задач обеспечения эксплуатационной надежности и эффективности работы трубопроводных систем является использование систем мониторинга режимов перекачки углеводородов в трубопроводах, построенных с применением методов математического моделирования процессов в трубопроводах и параметрического анализа гидродинамических величин.

Решение поставленной задачи возможно, во-первых, применением методов математического моделирования для описания движения углеводородных смесей в трубопроводных системах с учетом вышеотмеченных особенностей их

эксплуатации, и, во-вторых, использованием современных методов информационного мониторинга режимов перекачки углеводородных смесей в трубопроводах.

Математическое обеспечение мониторинга

Вопросам моделирования течений углеводородных сред в системах трубопроводного транспорта и связанных с ними процессов посвящено достаточно много работ отечественных и зарубежных ученых, в которых рассматриваются разнообразные аспекты построения моделей. Характерной особенностью применения методов моделирования в нефтегазовой отрасли является то, что многообразие происходящих процессов и техническая сложность трубопроводных систем предопределили использование практически всех основных способов создания моделей изучаемого «объекта».

В разное время вопросами математического моделирования течения 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. Антипов, В.А. Зысин, Э.Л. Китанин, А.К. Галлямов, Кутуков С.Е., Г. Уоллис и др.

К настоящему времени различными 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 углеводородных сред по трубопроводам, в частности газожидкостных смесей, является следующее [6, 16, 17, 18 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, размеры неоднородностей во много раз меньше чем диаметр 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.

4. В случае неизотермического течения для определения термодинамических параметров потока используется балансовое соотношение внутренней энергии, записываемое для каждой из фаз в отдельности. При этом обычно полагают, что термодинамические функции каждой фазы зависят только

от двух термодинамических параметров, например, истинной плотности и температуры.

5. При описании режимов движения углеводородов по трубопроводам в большинстве случаев ограничиваются изучением изменений параметров вдоль одной координатной линии – оси трубопровода, длина которого значительно больше диаметра трубы. При расчете нестационарных потоков необходимо учитывать вторую независимую переменную, которой является время.

В ТюмГНГУ на кафедре ПЭНХ под руководством профессоров Шабарова А.Б. и Земенкова Ю.Д. разработана обобщенная физико-математическая модель квазиодномерного течения углеводородных сред в трубопроводах, в которой учтены особенности и разнообразные физические воздействия [6]:

- подвод или отвод массы и энергии фаз, который характеризуется расходом, количеством движения и потоком полной энтальпии через боковые стенки. Все это необходимо учитывать при анализе утечек из-за нарушений герметичности и порывов трубопровода, промежуточных отборов продукта и слиянии потоков в трубопроводах;

- нестационарность течения, характеризуемая накоплением или оттоком массы, количества движения и полной энергии в контрольных объемах трубопровода. Нестационарность потока необходимо учитывать при расчетах режима запуска (остановки) трубопровода, на переходных режимах работы трубопровода, а также на аварийных режимах;

- подвод к перекачиваемой среде внешней работы, осуществляемый на перекачивающих станциях;

- работа сил трения для каждой фазы и тепловой поток в окружающую среду на рассматриваемом участке трубопровода;

- изменение площади поперечного сечения трубопровода, возникающее при отложениях на внутренних стенках, выпадении парафина, в случаях применения труб различного диаметра;

- фазовые переходы, характеризующиеся изменением расхода, импульса и полной энергии фаз.

Описанная модель позволяет учитывать максимум тех факторов, которые имеют место при эксплуатации трубопроводных систем на современном этапе их развития. Поэтому её использование при мониторинге гидродинамических параметров процесса перекачки является перспективным направлением в области контроля и управления режимами перекачки. Кроме того, в настоящее время на кафедре ведется работа по адаптации полученной модели для её использования к анализу различных режимов течения двухфазных потоков, в частности пробкового (пузырькового) или дисперсного режима течения.

Помимо отмеченного на кафедре ПЭНХ выполнены исследования гидродинамического состояния газонасыщенного потока на экспериментальной установке, общий вид которой представлен на рис. 1. В качестве рабочего тела использовались вода и водоглицериновая смесь, насыщенные углекислым газом.



Рисунок 1. Общий вид экспериментальной установки

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.

По результатам серии предварительных экспериментов выявлены основные закономерности изменения гидродинамического состояния газонасыщенного потока, так, например, получены графики распределения давления газонасыщенной жидкости в зависимости от времени по длине трубопровода (рис. 2).

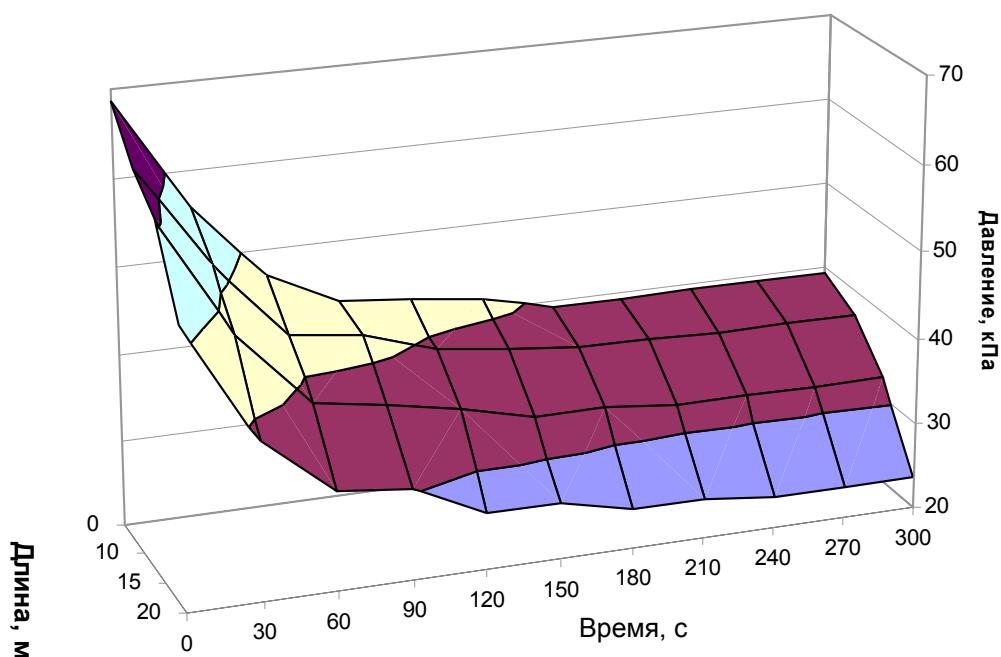


Рисунок 2. Изменение давления газонасыщенного потока по длине трубопровода в зависимости от времени

Информационное обеспечение мониторинга

В основу всех систем, предназначенных для наблюдения, контроля и управления параметрами исследуемого процесса заложен принцип, который формулируется, как «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 высокоскоростных ЭВМ и непосредственное участие

оператора позволяют осуществлять непрерывный контроль и управление параметрами исследуемого процесса в режиме реального времени [8, 9].

Для использования быстродействующих и высокопроизводительных методов сбора и обработки информации о состоянии технологического процесса перекачки при оценке гидродинамических характеристик транспортируемого потока необходимо корректное информационное обеспечение функций мониторинга. Поэтому требуется разработка метода информационного обеспечения мониторинга состояния контролируемого объекта, функционирующего в режиме реального времени, с использованием современных технических средств и программных продуктов.

Используемые в настоящее время системы мониторинга режимов перекачки, в основном ориентированы на решение задач обнаружения и прогнозирования утечек транспортируемого продукта. Так, например, система обнаружения утечек LeakSpy®NT, разработанная российской фирмой ООО «Энергоавтоматика» с использованием самых современных технологий и достижений отечественной аэрокосмической промышленности и используемая в подразделениях ОАО «Транснефть», предназначена для решения задачи обнаружения утечек в магистральных нефтепроводах. На предприятиях ОАО «Сургутгазпром» для этих же целей используют систему обнаружения утечек Sherlog Security Pipelines чешской компании АО «Текнолджи». Существующие системы мониторинга режимов перекачки углеводородного сырья получили развитие в конце прошлого столетия, при построении которых использовались математические модели и методы сбора и обработки информации, основанные на богатом опыте достижений отечественной и зарубежной науки и техники того времени.

Отмеченные характерные особенности эксплуатации трубопроводов определяют необходимость их учета при применении современных технологий мониторинга трубопроводных систем, к которым относятся системы контроля и управления режимами перекачки, построенные на базе гидродинамических моделей течения продукта в трубе. Качественное функционирование систем такого класса обеспечивается корректным и оперативным информационным обеспечением – первичными исходными данными

о состоянии режима перекачки. Применение возможностей современных высокочастотных ЭВМ и средств передачи информации позволяет осуществлять мониторинг функциональных параметров процесса перекачки в режиме реального времени.

В настоящее время совершенствование методов информационного обеспечения мониторинга возможно по двум направлениям: на базе штатных средств телеметрии или с использованием современных технических средств и программных продуктов.

Проведенный анализ методов информационного обеспечения мониторинга показал, что, штатные средства телеметрии морально устарели и не удовлетворяют потребностям настоящего времени, к которым относятся высокая точность измерений и широкий диапазон работы. Поэтому перспективным является использование современных технических средств и программных продуктов. Особым направлением совершенствования систем информационного обеспечения является использование возможностей космических спутников, оснащенных стандартным телеметрическим и оптическим оборудованием, как обобщающего инструмента технологий информационного мониторинга существующих и создаваемых средств передачи данных. Использование отмеченного, по мнению многих специалистов, позволит осуществлять контроль и управление параметрами технологического процесса перекачки на принципиально новом уровне, за счет своевременного и оперативного съема и доставки информации с контролируемого объекта (трубопровода) в целом по всей его длине в центральный диспетчерский пункт для последующего её использования гидродинамической моделью процесса перекачки, визуализации результатов расчета на ЭВМ с их привязкой к координатам трубопровода в горизонтальном и вертикальном направлениях на всем его протяжении. Интеграция полученной информации в алгоритм принятия управленческих решений по регулированию режимами работы трубопроводных систем в итоге позволит снизить энергетические затраты на перекачку, за счет предотвращения образования эксплуатационных осложнений по трассе трубопровода.

В основу разработанного на кафедре ПЭНХ ТюмГНГУ метода информационного обеспечения мониторинга заложена двухуровневая схема

обмена данными посредством интеллектуального устройства с возможностями самонастройки на специфику контролируемого объекта [8, 9]. Использование такого подхода позволяет резко снизить количество ложных срабатываний системы управления технологическим процессом перекачки, повысить корректность передачи и оперативность обработки информации за счет необходимого минимума используемых в этих целях технических средств.

Нижний (первый) уровень построен с использованием следующих технических средств [8, 9]:

1. датчика типа МЕТРАН-43-ДИ-Ех (для измерения избыточного давления транспортируемой среды);
2. датчика перепада давлений МЕТРАН-43ДД-Ех (для измерения перепада давлений);
3. преобразователя температуры МЕТРАН-200Т (для преобразования температуры жидкости, пара и газа в унифицированный токовый электрический выходной сигнал дистанционной передачи);
4. анализатора Агар (для определения процента влаги в транспортируемом потоке);
5. турбинного счетчика типа МИГ-150 (для измерения расхода транспортируемой среды).

Использованные на первом уровне технические средства обеспечивают высокую точность преобразования сигнала, его долговременную стабильность, а также стойкость к вибро- и гидроударам.

Верхний (второй) уровень реализован с применением программного пакета RSView32 6.0 и обеспечивает выполнение следующих функций [8, 9]:

- диалог с оператором-производителем работ;
- концентрацию, фильтрацию и накопление технологической информации;
- управление работой узлов и агрегатов нижнего уровня;
- обработку и хранение информации;
- формирование и ведение файлов оперативных данных, аварий, таблиц и их документирование;
- формирование и вывод на экраны мониторов оперативных данных в виде мнемосхем.

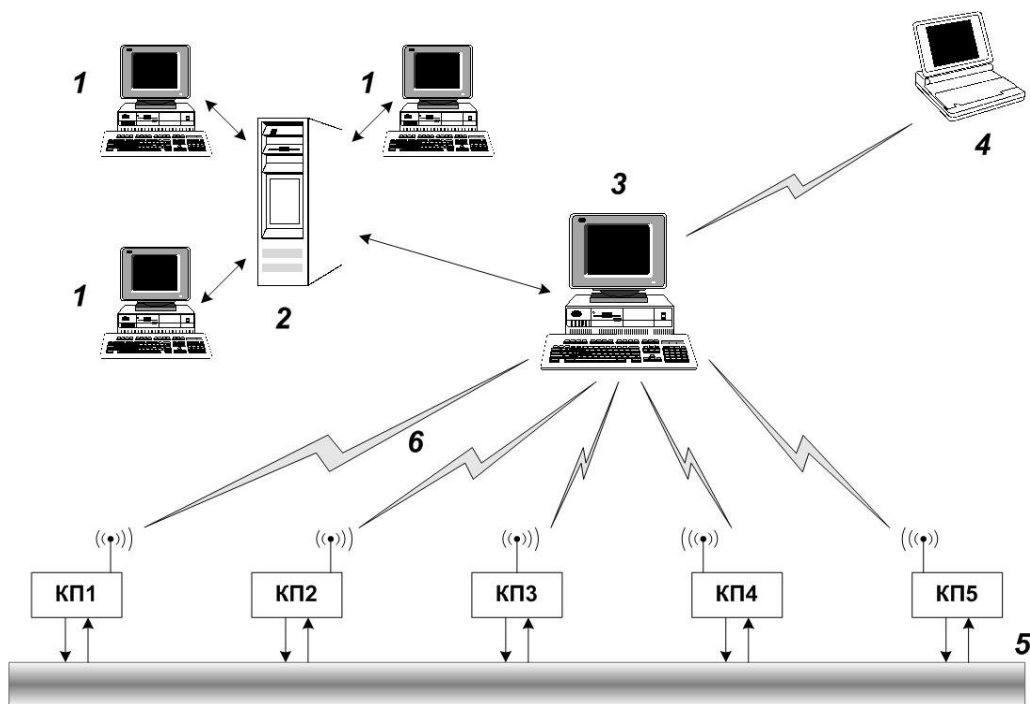


Рисунок 3. Схема организации информационного обеспечения мониторинга:
 1 – сетевой компьютер; 2 – сервер; 3 – диспетчерский пульт;
 4 – портативный ПК; 5 – линейный участок трубопровода;
 6 – дистанционная передача данных

Кроме того, предлагаемое интеллектуальное устройство, как основа разработанного метода информационного обеспечения мониторинга, выполняет следующие основные функции: обмен информацией между уровнями, обработка информации, контроль и управление технологическим процессом.

Таким образом, разработанный на базе интеллектуального устройства метод информационного обеспечения мониторинга обладает возможностью самонастройки на специфику конкретного контролируемого объекта. Как следствие, предлагаемый метод может быть адаптирован к условиям эксплуатации трубопроводов для контроля и управления технологическими параметрами в режиме реального времени.

Исследования динамики технико-экономических показателей эффективности разработанного метода мониторинга функциональных параметров технологического процесса показали целесообразность и перспективность внедрения в реальные условия эксплуатации трубопроводов.

Литература

1. Ахатов И.Ш. Разработки академической науки для решения некоторых проблем трубопроводного транспорта //Трубопроводный транспорт нефти. 2001. №3.
2. Белоусова В.А., Гурьева В.А., Казаков А.А., Липанова Н.И. Математическое моделирование процессов в магистральных нефтепроводах // Трубопроводный транспорт нефти. - 2001. - № 12.
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. Гусейнзаде М.А., Юфин В.А. Неустановившееся движение нефти и газа в магистральных трубопроводах. – М.: Недра, 1981. – 232 с.
6. Диагностика повреждений и утечек при трубопроводном транспорте многофазных углеводородов. Под общей редакцией Ю.Д. Земенкова. – Тюмень: Издательство «Вектор Бук», 2002. – 432 с.
7. Дудин С.М., Земенков Ю.Д., Шабаров А.Б. Оценка гидродинамического состояния углеводородных смесей в трубопроводных системах. / Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта: Материалы региональной научно-практической конференции. Часть 1 – Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. – с. 68-71.
8. Дудин С.М., Земенков Ю.Д. Методологическое обеспечение информационного мониторинга режимов перекачки в трубопроводных системах. / Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта: Материалы региональной научно-практической конференции. Часть 1 – Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. – с. 72-74.
9. Дудин С.М., Земенков Ю.Д., Шабаров А.Б. Использование компьютерных технологий в системе эксплуатационного контроля технического состояния трубопровода. Технологии Bentley в проектировании обустройства нефтегазовых месторождений: Материалы III конференции пользователей программного обеспечения Bentley Systems Ins. Тюмень: ОАО «Гипротюменнефтегаз», 2003.
10. Дудин С.М., Земенков Ю.Д., Трясцин Р.А. Проблемы трубопроводного транспорта газонасыщенных и газожидкостных смесей. // Интерстроймех – 2005: Труды международной научно-технической конференции. Часть.1 – Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. – с. 76-79.

11. Дудин С.М., Земенкова М.Ю., Шабаров А.Б. Повышение эффективности мониторинга режимов перекачки углеводородного сырья. // Проблемы геологии и освоения недр: Труды восьмого симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 400-летию города Томска, 2004. – с. 640-642.

12. Дудин С.М., Земенкова М.Ю., Шабаров А.Б. Моделирование гидродинамических процессов при трубопроводном транспорте углеводородов. // Интерстроймех – 2005: Труды международной научно-технической конференции. Часть.1 – Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. – с. 79-82.

13. 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. – 402 с.

14. Земенков Ю.Д., Коваленко В.Н., Кутузова Т.Т. Спутниковый ультразвуковой мониторинг магистральных трубопроводных систем. // Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта. Материалы региональной научно-практической конференции. Часть 1. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. – с. 94-98.

15. Земенков Ю.Д., Дудин С.М. Организация и управление производством на основе оценки и прогнозирования риска аварийных ситуаций на нефтепроводах. // Проблемы магистрального и промыслового транспорта углеводородов: Материалы международного совещания: Под общей редакцией Земенкова Ю.Д. и Ковенского И.М. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2000. – 53-57 с.

16. Модели технического обслуживания и ремонта систем трубопроводного транспорта./ Яковлев Е.И., Иванов В.А., Шибнев А.В. и др. – М.: ВНИИОЭНГ, 1993. – 276 с.

17. Моделирование задач эксплуатационных систем трубопроводного транспорта /Яковлев Е.И., Куликов В.Д., Шибнев А.В. и др. - М.: ВНИИОЭНГ, 1992. – 357 с.

18. Трубопроводный транспорт жидких и газообразных энергоносителей / Яковлев Е.И., Иванов В.А., Клюк Б.А. и др. – М.: ВНИИОЭНГ, 1993. – 387 с.

19. Трубопроводный транспорт нефти в сложных условиях эксплуатации / Черняев В.Д., Галлямов А.К., Юкин А.Ф. и др. – М.: Недра, 1990. – 232 с.