

# ПОДСЕКЦИЯ 1

## МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА, МАССЫ И ИМПУЛЬСА В ЗАДАЧАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

С.Н. Харламов<sup>1</sup>, М. Kireitseu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Делфтский технический университет, г. Дельфт, Нидерланды

*Цель работы:* дать анализ проблем, достижений в вопросах комплексного изучения тепло-, гидро- и газодинамических явлений, диффузионных процессов в узлах, аппаратах, используемых в химико-технологической и нефтегазовой отраслях промышленности; представить пути инновационного решения задач, обеспечивающих устойчивое управление и контроль процессов переноса в энергонапряженных областях оборудования; выполнить сравнительный анализ опыта моделирования явлений в гомогенных и гетерогенных углеводородных средах [в России (сибирской школой инженеров-механиков), за рубежом].

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) является важнейшей отраслью промышленности, обеспечивающей энергетическую безопасность и экономическую самостоятельность любой промышленно развитой страны. Вместе с тем, этот комплекс одновременно служит источником загрязнения окружающей среды. Поэтому вопросы повышения безопасности, эффективности, экологичности объектов ТЭК, систем их управления, выяснения условий повышения функционирования деталей и узлов, обеспечивающих транспорт сложных сред, являются ключевыми для рационального и экономического развития предприятий, снижения доли их вредного воздействия на окружающую среду. Хорошо известно, что газо- и трубопроводы высокого давления, устройства интенсификации тепло- и массообменных процессов в нефтяной и химической промышленности работают в условиях высоких энергозатрат, в том числе на транспорт природного сырья, в режимах устойчивых и переходных ламинарно-турбулентных эффектов, действия внешних сил, усиления и замедления смещения химически реагирующих компонент и фаз. Они чрезвычайно чувствительны к изменениям локальной структуры рабочей среды и требуют подробного анализа гидрогазодинамики и теплообмена, их закономерностей при взаимодействии со стенками замкнутых и открытых систем. В связи с этим проблемы численного и физико-математического моделирования, экспериментального изучения гидро- и газодинамики, тепло- и массообмена в инертных и химически реагирующих гомогенных и гетерогенных смесях весьма актуальны [1-3]. В последние годы за рубежом и в России резко активизировалась работа специалистов-механиков по следующим проблемам поиска решений в задачах:

- гидрогазодинамики и теплообмена, их закономерностей при перераспределении энергии течения смесей вязких сред в условиях слияния и/или разделения потоков в сложных трубопроводах (*Альгинов Р.А., Харламов С.Н., 2010-2013*); - процессов транспорта тяжелых углеводородных смесей (высоковязких масел, нефтей, водонефтяных эмульсий) и механизмов их разделения в трубопроводах, а также выработке предложения по значительной экономии насосной мощности при использовании воды, содержащейся в этой смеси в качестве смазки, в условиях раздельной периферийной подачи (*Brauner N.C., Chakrabarti D.P., Lovick J., Kireitseu M., Зайковский В.В., Харламов С.Н., 2001-2018*); - выяснение эффектов, сопровождающих процессы переноса импульса, тепла и массы при течении гомогенных и гетерогенных смесей в трубопроводах со сложной конфигурацией рабочей области (коротких и протяженных участков трубопроводов с секциями, например, сужения сечения в области поперечных сварных швов, при использовании втулок защиты сварного шва изнутри, а также в местах поворота и ветвления трубопроводов) на основе современных статистических моделей турбулентности второго порядка с дифференциальными уравнениями для однородных и смешанных моментов пульсаций поля скорости и скаляра (температуры, концентрации) (*Пахомов М.А., С. Снезиев, К. Ханьялич, С.Н. Харламов, 2001-2018*); - определения перспектив, достоинств и недостатков ряда статистических моделей турбулентности, которые используются в нефтегазовом комплексе при предсказании производственных процессов, связанных с течениями капельных и газообразных вязких сред при наличии регулярного характера ветвлений в трубопроводной сети (*С. Снезиев, К. Ханьялич, Kireitseu M., 2001-2018*).

В этой части особый интерес вызывают исследования технологических трубопроводов с применением средств бесконтактной регистрации параметров течения на базе лазерного доплеровского анемометра (*М. Kireitseu, D. Troolin, 2001-2018*), которые характеризуются высокой степенью разветвленности и наличием большого числа поворотов при сложных условиях прокладки по техническим площадкам; - выдаче рекомендаций по безаварийному управлению сложными течениями, прогнозу оптимальных режимов функционирования трубопроводов, точному контролю динамических и тепловых процессов в энергонапряженных зонах, секциях и узлах трубопровода [исследовательские центры при университетах США (Миннеаполис), Франции (Марсель), Германии (Дармштад), Англии (Манчестер, Краффилд, Бат)]. Стоит заметить, что опыт сибирских ученых (СО РАН, ТПУ, ТГУ, СибГТУ) весьма значителен в анализе малоизученных эффектов: прямого и обратного ламинарно-турбулентного перехода под действием стабилизирующих факторов: ускорения и торможения, вращения секций и элементов трубопроводного

**СЕКЦИЯ 17. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА. ПОДСЕКЦИЯ 1. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ**

оборудования, нагревом и охлаждением стенки (рабочей смеси), энерго- и структурного компонентного разделения под действием внешних сил; интенсификации механизмов переноса в областях отрыва и присоединения смесей; взаимодействия турбулентности и химических превращений; устойчивых и переходных явлений в нестационарных быстропротекающих процессах во внутренних системах (трубах, каналах, трубопроводах), исследовании гетерогенных смесей и фазовых процессов в сопряженных системах. Эти результаты весьма полезны в конструкторских разработках по созданию энергетических устройств промышленного назначения, в выдаче рекомендаций по снижению отрицательных факторов при сборе, сепарации, транспортировке, подготовке и хранении природного сырья, интенсификации механизмов теплообмена, разделения водонефтяных эмульсий, повышения ресурсов работы нефтеперерабатывающих установок, устранения последствий экологических катастроф, связанных с авариями трубопроводов и разливом нефтепродуктов (Николаев Е.В., Харламов С.Н., 2015-2017). В частности, в вопросах разработки экспериментальных методик и вычислительных технологий, апробаций популярных в приложениях версий двухпараметрических моделей турбулентности типа “энергия – масштаб”, “энергия - диссипация” к расчету течений со сложным характером взаимодействия конвективного и диффузионного переносов. А также в задачах оценки влияния фактора нестационарности на динамику, турбулентность, трение и теплоотдачу в сжимаемом и несжимаемом потоках в каналах и трубопроводах, учета эффектов взаимовлияния турбулентности и химических реакций при движении реагирующих потоков. Кроме того, при построении критериальных связей для трения и теплоотдачи в ускоряющихся течениях в трубопроводах, а также в разработке моделей сбора углеводородных сред на промыслах и транспортировке полученной гетерогенной системы, состоящей из нескольких простых и сложных фаз по трубопроводам большого диаметра; в вопросах проведения исследований по оценке и оптимальному использованию с точки зрения минимальных затрат энергии на трение и теплоотдачу при перемещении природного сырья по трубопроводу с напорными ламинарно-турбулентными режимами течений смесей (Альгинов Р.А., Сильвестров С.И., Ким В.Ю., 2010-2015). Следует отметить, что новыми в исследовании задач НГО выступают идеи и положения [1-3]: - моделирования, позволяющие учесть пульсации состава и тепло, гидро-, и газодинамических параметров в уравнениях турбулентного движения смесей жидкостей и газов, описывающие сложные течения со значительной температурной и компонентной стратификацией. Подход может быть реализован в описании многокомпонентных и многофазных сплошных сред на базе моделей с уравнениями для всех одноточечных корреляционных моментов пульсаций поля скорости, температуры и вещества; - быстрые маршевые алгоритмы численного интегрирования уравнений приближения узкого канала, укороченных уравнений Рейнольдса; - оригинальные алгоритмы для решения нестационарных задач о сдвиге течения смесей, численного интегрирования полных динамических уравнений (Навье-Стокса и Рейнольдса), переноса скалярного признака; - методики проведения экспериментов по изучению тепловой и динамической картины пространственных течений с теплообменом в трубах и каналах на базе средств бесконтактной регистрации с помощью LDV System TSI Inc.; - комплексные исследования аварийных режимов течений нефтепродуктов в магистральных трубопроводах в режимах пуска и останова насосного оборудования (M. Kireitseu, D. Troolin, 2001-2018). Уровень новизны предлагаемого инновационного решения в сфере трубопроводного транспорта нефти и газа подтверждают результаты длительных исследований, изложенных в [1-3]. Ниже (см. рис. 1-3) приведены отдельные данные исследований сложных процессов переноса в открытых термодинамических системах типа “внешняя среда – рабочее тело – стенка оборудования” при использовании гомогенных и гетерогенных углеводородных сред в качестве транспортируемого продукта в трубопроводе.

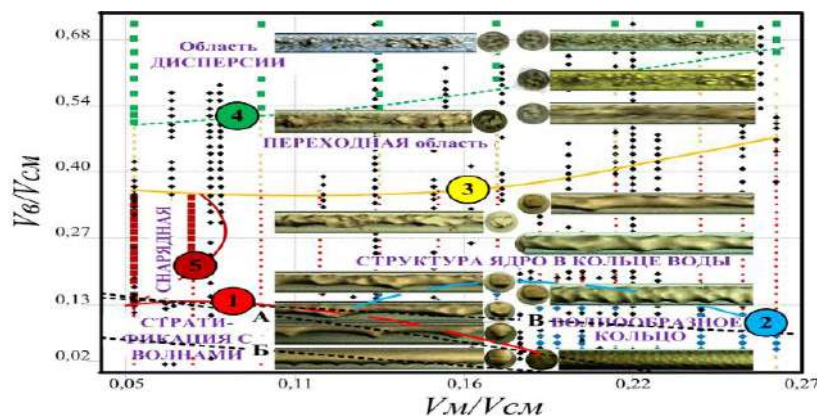


Рис.1 Шаблон карты существования устойчивых режимов течения двухфазных сред “жидкость-жидкость” в трубах

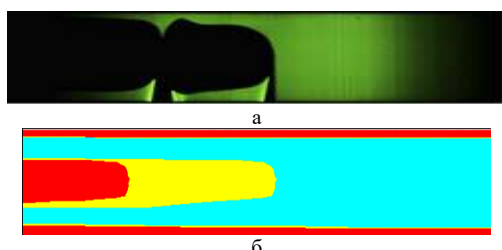
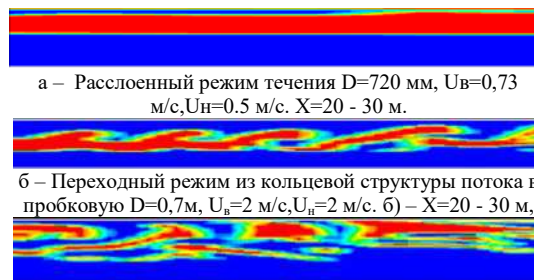


Рис.2 Пробковый режим течения.  $D=5,6$ мм.  $U_{mix}=0,8$  м/с,  $C_w=0,7$  а)-эксперимент, б)- визуализация результатов моделирования



а – Расслоенный режим течения  $D=720$  мм,  $U_w=0,73$  м/с,  $U_n=0,5$  м/с.  $X=20 - 30$  м.  
б – Переходный режим из кольцевой структуры потока в пробковую  $D=0,7$ м,  $U_w=2$  м/с,  $U_n=2$  м/с. б) –  $X=20 - 30$  м,  
в – Переходный режим течения из кольцевой структуры потока в пробковую  $D=0,7$ м,  $U_w=2$  м/с,  $U_n=2$  м/с. в) –  $X=30-40$  м.  
Рис.3. Картины течения двухфазного потока «нефть-вода»

#### Литература

1. Kharlamov S.N. Actual Problems of Hydrodynamics at Internal not Isothermal Flows in Fields of Mass Forces (p.183-232) / Chapter in monograph - Hydrodynamics: theory and model" Intech-Open, Rijeka, Croatia, 2012. – 307p.
2. Kharlamov S.N. Mathematical Modelling of Thermo- and Hydrodynamic Processes in Pipelines (monograph). Rome, Italy: Publ. House "Ionta", 2010. – 263p.
3. Kharlamov S.N., Kim V.Yu. Spatial Vortical Flows in Fields of Action of Centrifugal Mass Forces (monograph). Rome, Italy: Publ. House "Ionta", 2010. –112p.

### ЭВОЛЮЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ РАБОЧИХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ АППАРАТОВ И УСТРОЙСТВ В АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

Е.П. Васильев, М.О. Ткач

Научный руководитель - профессор С.Н. Харламов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Цель работы: формулировка проблем и деталей математического моделирования процессов гетерогенных выбросов продуктов промышленности в атмосферу. Вот уже два десятилетия проблема движения выбросов в атмосфере Земли весьма актуальна для множества исследователей. Причиной этого стали несколько факторов: экологическая обстановка в регионах с развитой нефтеперерабатывающей, химической и металлургической индустрией, а также в мегаполисах.

В ходе данной работы поставлена цель: рассмотреть модели гидродинамики, переноса, фотохимии и химических процессов гетерогенных выбросов промышленных рабочих систем, а также представить численные решения для моделирования гетерогенных выбросов в приземном слое атмосферы Земли.

Эта проблема глобальна и актуальна для стран с развитой промышленностью, так как развитая промышленность значительно влияет на глобальный климат Земли. Сложность поставленной перед людьми задачи обусловлена трудностью предсказания поведения атмосферы Земли, многокомпонентностью и многофазностью выбросов антропогенного характера. Также добавляет сложность реакция газов атмосферного воздуха с антропогенными выбросами. В результате развития информационных технологий сейчас наиболее рациональным и доступным способом моделирования стало численное моделирование динамики системы антропогенных выбросов. [1-3]

Обычно атмосфера Земли воспринимается как динамическая система. Различного рода физико-химические реакции, все время, происходят внутри атмосферы Земли. В зависимости от определенной характеристики определенного района интенсивность этих физико-химических процессов будет меняться. Внутри всего объема атмосферы Земли происходят реакции в газовой фазе, с различной интенсивностью, а на поверхности взвешенных твердых и жидких частиц внутри стратосферы и тропосферы происходят гетерогенные процессы.

Особый интерес вызывает исследование тяжелых выбросов, в связи с тем, что они несут наибольшую опасность для экологии и имеют сложную динамику. В числе тяжелых выбросов можно найти горючие газы и ядовитые соединения. Вредные вещества попадают в атмосферу Земли за счет антропогенных аэрозолей. Поэтому можно сказать, что антропогенные аэрозоли существенно способствуют выпадению кислотных дождей, появлению смога и так далее. Но антропогенные аэрозоли имеют положительную сторону – они могут эффективно выводить антропогенные загрязнения из атмосферы Земли. Размер частиц значительно влияет на химический состав частиц, что приводит к зависимости физики аэрозолей и химии атмосферы Земли от размера частиц. На данный момент наиболее приоритетно исследовать пространственно-временную изменчивость частиц в атмосфере Земли, учитывая их физические и химические свойства.

Из-за того, что Земная поверхность неоднородна и процессы переноса, которые здесь рассматриваются в горизонтальных плоскостях протекающие внутри атмосферы турбулентные, применяются гидротермодинамические модели для решения задач динамики аэрозолей и газовых примесей. [3,4]

Воспользуемся моделями для тензора напряжений Рейнольдса для нахождения коэффициентов турбулентного обмена в горизонтальных плоскостях, а для вертикального ( $k - \epsilon$ ) – моделью. Структуру приземного слоя опишем на основе теории Мониана-Обухова [3], а также на основе эмпирических функций