

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ
ТРАНСПОРТИРОВКИ И ХРАНЕНИЯ
НЕФТИ И ГАЗА**

**ПОДСЕКЦИЯ 1
МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ
УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ**

**ПРОЦЕССЫ ТРАНСПОРТА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ВЯЗКИХ СРЕД В УСЛОВИЯХ
СЛОЖНОГО СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТРУБОПРОВОДАХ:
ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

С.Н. Харламов

профессор, доктор физико-математических наук

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Цель настоящей работы заключается в анализе современных проблем, подходов и методов изучения процессов транспорта углеводородных сред в замкнутых системах (трубопроводах, трубах, каналах с произвольной поверхностью стенки, изменений состава, структуры течений из-за деформаций, обусловленных ускорением, торможением, усилением и замедлением вращения в рециркуляционных областях, переходниках), а также в выдаче рекомендаций к прогнозу сопротивления и интенсивности теплопереноса во внутренних сложных сдвиговых инертных и химически реагирующих средах.

Введение. Почти все процессы, сопровождающие транспорт углеводородных вязких гомогенных и гетерогенных смесей в трубопроводах, осложнены: иррегулярностью изменений их локальных параметров и свойств; фазовыми эффектами и теплопереносом с окружающей внешней средой, влиянием внешних сил [1-3]. Такие движения всегда сложны, трехмерны, неустойчивы в малом. Их главная особенность заключена в интенсивном перемешивании, вызванном теплогидродинамическими пульсациями компонент состава смеси. Они вносят большой вклад в процессы переноса импульса, тепла и массы при транспортировке сырья и, следовательно, имеют определяющее влияние на распределения скорости, температуры, удельных концентраций во всем поле движения смесей [1-4]. Турбулентность характеризуется широким спектром частотных характеристик движения. В инженерной практике их непосредственный расчет без применения моделей турбулентности в широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса неосуществим даже с использованием супер ЭВМ [4-6].

Актуальность. В настоящее время в связи с быстрыми темпами совершенствования вычислительной техники интерес к методам моделирования процессов турбулентного переноса импульса, тепла и массы значительно вырос. Поскольку турбулентность испытывает влияние многих факторов, то естественно, что простые процедуры расчета, включающие эмпирические формулы для коэффициентов молярного переноса, имеют невысокий шанс реалистичного описания. Они полезны только для очень специфических, простых задач и дают только интегральную информацию, но не детали, необходимые для практики нефтегазовых приложений. Полное представление о характеристиках турбулентности может быть получено из многомерных численных расчетов. Однако большинство таких расчетов может быть выполнено лишь с привлечением модельных представлений. Имеются различные возможности для описания турбулентности: прямое численное моделирование (ПЧМ), моделирование крупных вихрей (МКВ) и статистическое моделирование, использующее модели турбулентности [1, 3-7]. Хорошо известно, что транспорт природного сырья по трубопроводу предсказывается системой полных дифференциальных уравнений Навье – Стокса и неразрывности для смеси в целом и изменения индивидуальных компонент (и фаз), энергии и состояния. Эти нелинейные дифференциальные уравнения математической физики второго порядка описывают все детали пульсационного пространственного движения и дополняются специфическими связями к определению изменений теплофизических свойств. В случае их численного разрешения можно надеяться на получение детальной картины течения и теплопереноса. Однако, применение численных методов связано дискретизацией искомых величин разностной сеткой, поэтому могут быть рассчитаны лишь движения с масштабами, большими, чем размеры ячейки. В настоящее время из-за ограничений в быстродействии и памяти ЭВМ ПЧМ на практике возможно исследование процессов только с относительно низкими числами Рейнольдса. Однако метод ПЧМ становится весьма ценным и очень полезен для описания турбулентной структуры в специфических зонах отрыва и присоединения, ускорения и торможения. В отсутствие экспериментальных данных он способен дать полную информацию о картине течения и может участвовать в оценке эффективности турбулентных моделей.

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

Особенности применения ПЧМ можно найти в [1, 4-9]. Заметим, что в результате решения проблем, связанных с интегрированием уравнений Навье – Стокса методами ПЧМ, получил развитие метод крупных вихрей (МКВ) [1, 5], в котором масштабы движения, большие размеров ячейки, рассчитываются непосредственно из уравнений, а мелкомасштабные – подлежат моделированию тем или иным способом. Работы, использующие эту идеологию, активно проводятся за рубежом и в России (см. например, [1, 3-9]). Такой подход применяется также и при решении нефтегазовых задач. МКВ дает довольно детальную картину и, несомненно, имеет хорошие перспективы для развития в ближайшем будущем. При рассмотрении статистических полей (осредненных полей) искомым характеристикам в настоящее время широкое распространение имеет моментный подход, а также метод использования приближенных эмпирических соотношений и предположений чисто эвристического характера, достоверность которых не вызывает сомнения в ряде частных случаев транспорта систем по трубопроводам. Стоит отметить, что статистические модели турбулентности способны предсказывать весь спектр турбулентных масштабов течения и тепломассопереноса.

Результаты и их анализ. Ориентируясь на нефтегазовые приложения в работе показано, что в рамках моментного подхода в задачах транспорта можно выделить три основных способа моделирования турбулентности. Два используют понятие вихревой вязкости, в котором турбулентные напряжения Рейнольдса предполагаются пропорциональными градиентам средней скорости с коэффициентом пропорциональности (вихревая вязкость), определяющим интенсивность турбулентного обмена. Третий подход основан на непосредственном определении напряжений Рейнольдса и компонент векторов турбулентных потоков скаляра (тепла и массы) из дифференциальных уравнений и известен, как полная схема замыкания на уровне моментов второго порядка. Модели первых двух типов составляют модели: нулевого порядка, одно-, двухпараметрические, к третьему относятся многопараметрические модели переноса рейнольдсовых напряжений и потоков (RSS-Fluxes). Отмечается, что использование понятия коэффициента вихревой вязкости (диффузии, температуропроводности) позволяет строить решения, пригодные лишь в конкретных условиях (течения инертных сред без особенностей, обусловленных наличием специфических внутренних и внешних сил). Сложные турбулентные движения, часто встречающиеся в нефтегазовой отрасли, ее инженерных приложениях (трубопроводы при неустановившихся процессах пуска и торможения потока, включения и выключения оборудования, химических реакциях, фазовых переходах, изменений формы поперечного сечения и т.д.), требуют использования более общих приемов и подходов численного моделирования. Отмечается, что практические потребности в изучении сдвиговых течений способствовали формированию тенденции к построению технологичных моделей турбулентного переноса, содержащих транспортные уравнения для одноточечных корреляционных моментов второго, третьего порядка, а также отдельные уравнения для двухточечных моментов, и позволили перейти от глубоко эмпирических подходов в нефтегазовых проблемах к RSS-Fluxes моделям в сущности *полуэмпирическим*. Расчетами процессов транспорта сырья в трубопроводах со сложной границей и действием массовых сил показано, что в данных задачах рассматриваемые модели *существенно более надежны*. Особенно при изучении процессов транспорта в трубопроводах со сложной геометрией, а также в процессах, осложненных круткой потока (задачи с установлением и прогнозом размеров и интенсивности течений в рециркуляционных зонах). Отмечается, что недостаточная апробация таких моделей все еще определяет необходимость их широкого тестирования. Наибольший вклад в решение вопроса по модификации существующих моделей был внесен В.Е. Launder, К. Hanjalic, W. Rodi, R.M.C. So, S. Elghobashi, N. Shima, В.А. Коловандиным, А.Ф. Курбацким, Э.П. Волчковым и другими [1, 5-9]. Справедливо отметить, что с точки зрения создания надежных численных методик большинство из рассматриваемых математических моделей все еще не выглядят универсальными. Результаты исследований показывают, что проблема конструирования таких многопараметрических моделей *будет сопряжена* с необходимостью расширением банка экспериментальных данных о транспортных процессах в трубопроводах, содержащих сведения о структуре инертного и химически реагирующего потока, составе и интенсивности турбулентности, которые в настоящее время противоречивы.

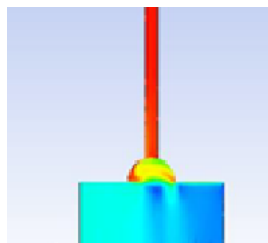


Рис. 1

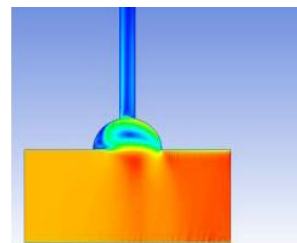


Рис.2

Характерные картины интенсивности изменений полей температуры (рис.1), скорости (рис.2) углеводородного газа при его транспорте по трубопроводу с тройниковым соединением и тупиковым отводом (расчеты выполнены с использованием RSS-Fluxes – kL- модели [1], отвечают $Ho=0,015$, $Re=10^5$, $P=10$ Мпа, $T_0=278K$).

Отчетливо видно формирование размеров рециркуляционных зон с последующей интенсификацией теплообмена и разогрева отвода вследствие волновых и вихревых процессов. Также, результатами расчетов установлено: 1. Транспорт углеводородного сырья в реальных условиях течения сырья по трубопроводу

испытывает как стабилизирующее, так и дестабилизирующее действие, обусловленное действием массовых сил (закруткой) и нестационарностью функционирования оборудования. Причем стабилизирующий эффект может быть связан с появлением дополнительной деструкции турбулентности, дестабилизирующее действие обусловлено искривлением профилей осредненных характеристик течения под воздействием крутки. Исследование поведения коэффициента полного трения показывает, что роль азимутальной составляющей трения становится заметной при параметрах закрутки $Ro > 0,5$, причём увеличение трения с ростом Ro может быть значительным (до 4-5раз) уже начиная с $Ro > 0,5$ при умеренных числах Re ($Re \geq 5 \cdot 10^4$). 2. Основные различия в качественных и количественных оценках параметров сложных течений, выполненных до настоящего времени, были связаны с ущербностью моделирования. Во многих моделях эффекты вращения учитывались посредством модификации соотношений, определяющих длину смешения, и не делалось обращения к анализу пульсационной структуры. 3. При наложении на осевое течение вращения прогноз транспортировки среды следует выполнять по моделям, учитывающих анизотропию турбулентности. Расчетами показано, что в таких процессах диагональные элементы тензора напряжений Рейнольдса значительно разнятся и поперечный турбулентный перенос импульса начинает непропорционально быстро расти в сравнении с переносами в других направлениях. Прогноз теплообмена при транспортировке природного сырья в условиях сложного сдвигового движения по трубопроводу со сложной поверхностью стенки показывает актуальность построения универсальных связей типа: $Nu = f(Re, Pr, Gr, l/R, Ro, K_{\Omega})$, где $Re = U_0 D / \nu$, $Pr = \nu / a$, $Gr = g \beta \Delta T l^3 / \nu$, $Ro = W_0 / U_0$, $K_{\Omega} = \Omega W / g$. Интенсификация теплоотдачи может корректно описываться критериальной связью типа: $Ko = Nu / [Pr^{0,43} Gr^{0,1} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} \varepsilon_l]$, где индекс (о) соответствует прямооточному режиму транспорта сырья.

Литература

1. Бубенчиков А.Н., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Издательство ТГУ, 2001. – 441 с.
2. Николаев Е.В., Харламов С.Н. Исследование сепарационных процессов углеводородных многокомпонентных систем в режимах функционирования оборудования предварительной подготовки нефти // Известия Томского политехнического университета, 2016. – Т. 327. – № 7, – С. 84–99.
3. Jones W. P. Turbulent Reacting Flows, pp. 309-374. Academic Press, London, San Diego, New York, 1994.
4. Treumiet, T. C., Nieuwstadt, F. T. M. & Boersma, B. J. 2006 Direct numerical simulation of homogeneous turbulence in combination with premixed combustion at low Mach number modelled by the G-equation // J. Fluid Mech. 2006. Vol. 565, P. 25–62.
5. Dejoan A., Leschziner M. A. Large eddy simulation of a plane turbulent wall jet // Phys. Fluids, 2005. Vol. 17, 025102.
6. Huang P. G., Coleman G. N., Bradshaw, P. Compressible turbulent channel flows: DNS results and modelling // J. Fluid Mech. 1995. Vol. 305, P. 185–218.
7. Tomiyama N., Fukagata K. Direct numerical simulation of drag reduction in a turbulent channel flow using spanwise traveling wave-like wall deformation // Phys. Fluids 2013. Vol. 25, 105115
8. Abe K., Kondoh T., Nagano Y. A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, pp. 139-151., 1994.
10. Alvelius K., Johansson A.V. Direct numerical simulation of rotating channel flow at various Reynolds numbers and rotation number. In PhD thesis of K. Alvelius. Dept. of Mechanics, KTH, Stockholm, Sweden, 1999.

МЕТОДЫ ВТОРИЧНОГО ВСКРЫТИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ КУМУЛЯТИВНАЯ ПЕРФОРАЦИЯ

Априлино Курмасела

Научный руководитель – профессор С.Н. Харламов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Цель работы заключается в поиске условий оптимизации функционирования искусственных скважин в процессе увеличения добычи газа и нефти. Задача вторичного открытия состоит в том, чтобы создать идеальную гидродинамическую связь между скважинами и водохранилищами, не влияя на свойства коллектора.

В данной работе обсуждаются отдельные проблемы такие как: 1. Технология вторичного вскрытия продуктивных пластов. Она мало, чем отличается от бурения основного скважинного ствола, поэтому не берет в расчет механические качества пластов породы. Выбор технологии вскрытия для нефтяной скважины воздействует на особенности освоения месторождения и играет важную роль в формировании характеристик конкретной скважины. Первичное и вторичное вскрытие продуктивного пласта. Первичным вскрытием называется разбуривание продуктивного пласта, а к вторичной относится перфорация [1]. Первичное вскрытие считается первой частью работ и они проводятся в самом пласте [1].

Методы вскрытия продуктивных пластов применяют для: защиты от ухудшения фильтрационных свойств призабойной области в ходе вскрытия пластов с низким уровнем давления; предупреждения фонтанирования скважины при высоком давлении; повышения надежности конструкции трубопроводов, ствола и забойной зоны [2]. Заметим, что в ходе вторичного вскрытия, которое осуществляется перфорированием, могут использоваться различные перфораторы. Их выбор осуществляется с учетом давления пластов, данных о механических свойствах породы и степени проницаемости. Наиболее популярны пулевые, кумулятивные, гидropескоструйные, фрезерные и торпедные их разновидности [3].

Анализ показывает, что вскрытие продуктивных пластов сопряжено с проблемами *пулевой перфорации*. При подобной перфорации скважин пуля движется по стволу канала перфоратора, а на