

$$\sigma_{\varepsilon} = \sigma_{\varepsilon 1} V f 1 + \sigma_{\varepsilon 2} V f 2 \quad (7)$$

где  $\sigma_{\varepsilon 1}$  и  $\sigma_{\varepsilon 2}$  – электропроводность касторового масла и воды соответственно [3].

Выполнив данные расчеты, выдвигается предложение о дополнении плоской системой электродов в электродегидраторах, которые используются в настоящее время, электродами, формируют каналы для прохождения нефти через конфузур, затем через зону постоянного сечения, после - через диффузор. Такое предложение позволяет изменить устройство потоков в установке и повысить количество удаляемой воды из нефти.

Стоит отметить, что использование электрического поля способствует улучшению процесса деструкции и коагуляции капель воды только при определенных значениях напряженности электрического поля.

С помощью модели, которая предложена в данной работе, можно провести анализ происходящих процессов, а также выбрать величины, режимы работы электрогидродинамических устройств, принимая во внимание особенности деструкции и коагуляции капель воды.

Учитывая все эффекты, которые описаны выше, можно:

- 1) выбрать наиболее подходящую конструкцию электроддегидратора;
- 2) добиться более мелкого диспергирования и оперативного слияния капель в электродегидраторах;
- 3) избежать электрического замыкания электродов в рабочей зоне электродиспергаторов и электрокоагуляторов

#### Литература

1. Tarantsev K.V. Study of Electrohydrodynamic Effects at a Liquid-liquid Interface Using Glass Screens between Electrodes. Chemical and Petroleum Engineerig. №. 46. С. 130-136.
2. Филимонова, Е. И. Основы технологии переработки нефти: Учебное пособие / Е. И. Филимонова. – Ярославль: издательство ЯГТУ, 2010. – 171 с.
3. Харламов С.Н., Зайковский В.В., Муратов В.М. Экспериментальное исследование движения капель воды в водонефтяной эмульсии при разделении в неоднородном электрическом поле // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2016. - Т. 327. - №. 10. - С. 22-34.

## СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ СЛОЖНЫХ ТЕЧЕНИЙ

**Д.С. Фатьянов**

Научный руководитель профессор С.Н. Харламов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Цель работы: выяснение преимущества полуэмпирического метода моделирования сложных сдвиговых течений в трубопроводах и прогноз пространственных ламинаризирующихся потоков.

Математическое описание различных физических процессов, которые окружают нас постоянно, и влияние которых требуется учитывать в огромном количестве сфер деятельности человека, казалось бы, должно быть уже давно изучено со всех возможных сторон. Однако, при более тщательном изучении тех или иных явлений, становится ясно, что это не всегда возможно, и именно поэтому строгие математические модели достаточно сложны или отсутствуют вовсе.

Попытки создания практически применимых математических моделей, способных описать сложные течения, если брать отсчет времени, начиная с опытов, проведенных Осборном Рейнольдсом, ведутся на протяжении уже более ста лет. Несмотря на это, до сих пор расчет сложного течения является трудноразрешимой задачей, а получение достоверных, проверенных экспериментально, всё ещё остается скорее исключением.

С одной стороны, сама проблема математического описания турбулентного течения может считаться решенной еще в первой половине XIX века, ведь описывается такое течение уравнениями Навье-Стокса. Однако на данный момент подтвержденные решения имеются только для нескольких случаев с простой геометрией. В других случаях применяется математическое моделирование. Но, хотя несомненно, что сегодня вычислительная техника может считаться очень развитой, ее возможностей все ещё недостаточно для проведения качественных расчетов течений при высоких числах Рейнольдса, которые и являются наиболее интересными с практической точки зрения и наименее изученными. В этом случае, основной проблемой становится поиск таких моделей, которые при наибольшем возможном количестве допущений, все же позволяют получить точность, достаточную для конечных потребителей.

Существующие сегодня подходы к моделированию турбулентности можно с некоторой степенью условности на четыре основные категории. Первая – наиболее распространенная в силу не такой большой требовательности к вычислительным ресурсам группа – методы, основанные на использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes), замкнутых с применением полуэмпирической модели турбулентности. Вторая – прямое численное моделирование турбулентности (DNS – Direct Numerical Simulation). В этом случае трехмерные уравнения Навье-Стокса разрешаются численно всех пространственно-временных масштабов. Плюсом этого подхода является его полная независимость от соотношений, полученных эмпирическим путем. Третья группа – метод моделирования крупных вихрей (LES – Large Eddy Simulation). Здесь предварительно осуществляется фильтрация вихрей по их масштабу. Уравнения для части масштабов разрешаются так же численно, отфильтрованные же масштабы моделируются с использованием полуэмпирических зависимостей. Это позволяет уменьшить требования к производительности

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

техники, однако снижается и точность результатов. И еще одна группа – методы, основанные на совместном использовании RANS и LES подходов для различных областей потока. Это так называемые DES (Detached Eddy Simulation) методы, то есть методы моделирования отсоединенных вихрей.

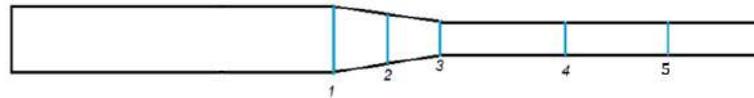
Все приведенные выше методы имеют свои достоинства и недостатки, связанные как с их прогностическими возможностями, так и необходимыми затратами вычислительных ресурсов. Так, Филипп Спаларт в своем исследовании [7] предполагал, что достаточные для проведения в течение суток одного сложного расчета методом LES вычислительные мощности появятся только в 2045 году, методом DNS – в 2080.

На сегодняшний день вопрос точности математического моделирования процессов, связанных со сложным прогнозом внутренних течений стоит довольно остро, от него напрямую зависят результаты деятельности в самых разнообразных отраслях промышленности. Например, в [4] и [5] были проведены расчеты течения флюидов по трубопроводу с конической секцией с использованием нескольких модификаций RANS  $k-\varepsilon$  модели турбулентности (где  $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной энергии) с целью установления наличия переходных турбулентно-ламинарных процессов после конфузора и определения их влияния на характеристики потока. Изучение данного вопроса было связано с тем, что в 2014 году в ходе исследования [1] было выяснено, что при применении конфузورных секций для присоединения тупиковых ответвлений к трубопроводу большого диаметра на крановых узлах ООО «Газпром трансгаз Томск» имеют место явления разогрева газа до температуры, недопустимых для надежной работы оборудования.

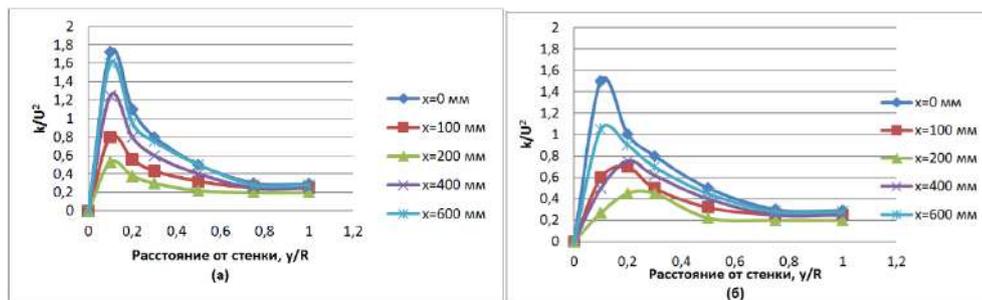
Исследуемая модель трубопровода представлена на рисунке 1. Длина конической секции – 200 мм.

Расчетами было установлено, что после прохождения среды через конфузорную секцию наблюдается процесс гашения турбулентного переноса в радиальном направлении, вызванный ламинаризацией течения. Процесс ламинаризации в свою очередь может сопровождаться явлениями разогрева среды вследствие перехода части кинетической энергии турбулентности в энергию тепловую.

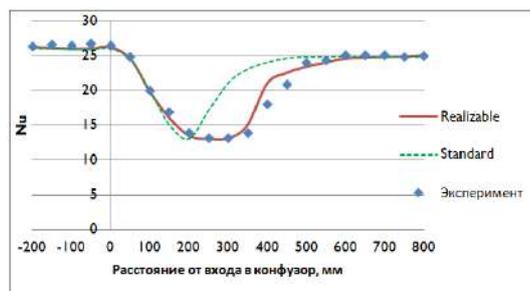
Для характеристики тепловых процессов, протекающих в среде, рассчитывались значения критерия Нуссельта. Полученные данные сравнивались с результатами эксперимента [2]. Для малых значений тангенса угла сужения конфузорной секции ( $\beta \leq 8/200$ ) realizable  $k-\varepsilon$  [6] модель в силу некоторых своих особенностей точнее, чем standard [5] предсказывала момент начала обратного перехода к турбулентности после сужения. При увеличении же тангенса угла наклона до значений более  $8/200$  появлялись серьезные расхождения с экспериментальными данными, что в свою очередь говорит о недостаточной точности использованных в расчетах математических моделей для описания ситуаций, когда имеют место эффекты ламинаризации потоков и наличие отрывных течений.



**Рис.1 Участок трубопровода с конфузорной секцией. 1, 2, 3, 4, 5 – исследуемые сечения.**



**Рис.2 Деформация расчетных профилей кинетической турбулентной энергии в зависимости от расстояния от начала конфузорной секции при  $\beta=8/200$ ,  $Re=10000$ . а – standard  $k-\varepsilon$  модель, б – realizable  $k-\varepsilon$  модель**



**Рис.3 Сравнение результатов расчета критерия Нуссельта по длине трубы для различных моделей турбулентности при  $\beta=8/200$ ,  $Re=10000$**

Дальнейшее изучение применимости известных математических моделей, их усовершенствование и создание новых моделей позволит получать максимально приемлемые результаты, повторяющие реальные или приближенные к ним, а также постепенно снижать зависимость от используемых вычислительных мощностей.

Литература

1. Агиней Р.В., Парфенов Д.В. Экспериментальные исследования нагрева тупиковых ответвлений крановых узлов при заполнении газом магистрального газопровода «Сахалин–Хабаровск–Владивосток» // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. 2014. №3. С. 50-53
2. Танака Х., Кавамура Х., Татено А., Хатамия С. Влияние ламинаризации потока и его последующей турбулизации на теплообмен в случае течения при малых числах Рейнольдса в канале, состоящем из конфузорной секции и следующей за ней секции с постоянным поперечным сечением // Труды американского общества инженеров-механиков «Теплопередача». – М., 1982. – №2 – С.144-153.
3. Фатьянов Д.С. Термодинамические характеристики течения газа в трубопроводе с конфузорной секцией // Труды XXI Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск, 2017. – С. 236-239
4. Фатьянов Д.С. Управление термодинамическими возмущениями при течении вязких сред по трубопроводу с коническим переходом в тупиковых ответвлениях // Труды X Всероссийской научной молодежной конференции с международным участием с элементами молодежной научной школы имени профессора М.К. Коровина. – Томск, 2017. – С.762-764
5. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbukence flows // Comput. Meth. Appl. Mech. Engng. 1974. Vol.3. P. 269.
6. Shih T., Liou W. W. A new k-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows // Comput. Fluids, 1995. Vol. 24. P. 227.
7. Spalart P. R. "Strategies for turbulence modeling and simulations" // Int. J.Heat Fluid Flow, 2000. – Vol. 21. – P. 252–263.