

- величина напряжений переменна по длине трубы. В местах соприкосновения трубопровода с грунтом наблюдается повышенный уровень напряжения;
- значения напряжений, возникающие при выпучивании трубопровода в глинистых грунтах, достигают величин, близких к пределу текучести стали, что влияет на долговечность трубопровода, однако напряжения, возникающие в песках, согласно меньше предела прочности и текучести стали [1]. Следовательно, при создании между нижней образующей трубы и естественным грунтом прослойки из песка или другого рыхлого грунта, можно свести к минимуму все негативные последствия, связанные с выпучиванием трубопровода.

### Литература

1. ТУ 14-3-1573-96 Трубы стальные электросварные. – Москва: Изд-во стандартов, 1996.
2. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
3. Механика грунтов [Текст]: В.Е. Шутов, Г.Г. Васильев, Ю.А. Горяинов, А.Д. Прохоров, Л.С. Чугунов. – М.: Изд-во «ЛОРИ», 2003. – 128 с.
4. Федоров Ю.Ю., Савнина А.В. Напряженно-деформированное состояние подземных газопроводов в условиях многолетней мерзлоты // Нефтегазовое дело. – 2008. – № 1.

### **УПРАВЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ ПРИ ТЕЧЕНИИ ВЯЗКИХ СРЕД ПО ТРУБОПРОВОДУ С КОНИЧЕСКИМ ПЕРЕХОДОМ В ТУПИКОВЫХ ОТВЕТВЛЕНИЯХ**

**Д.С. Фатьянов**

Научный руководитель профессор С.Н. Харламов

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

Исследование закономерностей течения флюидов в трубопроводах с участками сложной геометрической формы представляет интерес как с теоретической, так и с практической точек зрения. Даже незначительные, казалось бы, особенности геометрии могут ощутимо влиять на гидродинамические и тепловые параметры потока.

Так, например, исследованиями [1] было установлено, что при применении конических переходов для присоединения стоячков отбора газа и байпасных линий меньшего диаметра наблюдается разогрев газа до температур, превышающих допустимые пределы, что особенно опасно в условиях вечной мерзлоты. Однако при применении прямой врезки разогрева не наблюдается.

На сегодняшний день на практике во время проектирования трубопроводных сетей и учета особенностей динамики процессов, протекающих при течении флюидов в каналах сложной формы, применяются полуэмпирические технологии, которые не всегда позволяют проникнуть в суть механизмов переноса массы, импульса и тепла и сделать вывод о реальных нагрузках и энергонапряженности рабочих элементов.

В таких условиях актуальной представляется задача разработки адекватных математических моделей пространственных турбулентных течений в трубопроводах, осложненных процессами пространственной и тепловой деформации рабочей среды вследствие прохождения особых зон трубопроводов специфической формы поверхности стенки и выявление границ применимости

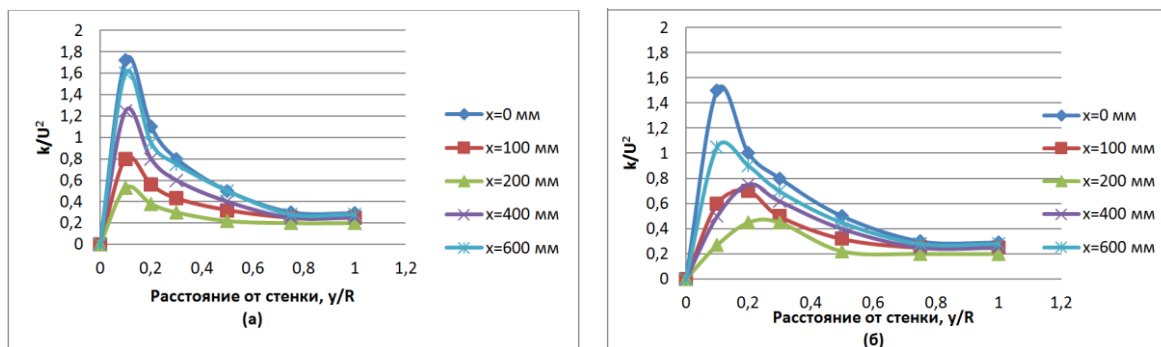
#### СЕКЦИЯ 4. НОВЕЙШИЕ СИСТЕМЫ, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОДВОДНОГО ИЗУЧЕНИЯ ШЕЛЬФА АРКТИКИ И ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

более простых моделей в оценке явлений в трубопроводах и обобщении используемых полуэмпирических методик.

Течение флюида в тупиковом ответвлении с коническим переходом представляет собой сложный процесс его деформации в тройнике, конфузоре и тупике. Без выяснения закономерностей течения, совместно с анализом возможностей рассматриваемых математических моделей адекватно их предсказывать, в каждом из частных случаев, нельзя говорить об их адекватности в предсказании поведения потока при прохождении участка сложной геометрии, состоящего из их совокупности. Поэтому процесс был разбит на несколько составляющих. Здесь приводятся только данные о течении флюидов в конфузورной секции.

В настоящей работе использовались различные, имеющие свои особенности, модификации  $k-\varepsilon$  модели турбулентности ( $k-\varepsilon$  standard [5],  $k-\varepsilon$  RNG [7],  $k-\varepsilon$  realizable [6]), как одной из наиболее популярных на сегодняшний день и включенных во все пакеты по расчету гидродинамики.

Рассматривалась задача о неизотермическом движении газа в канале с конфузорной секцией. Геометрические параметры трубы и граничные условия принимались в соответствии с проведенными ранее реальными экспериментами [3, 4]. Постановка задачи стационарная.



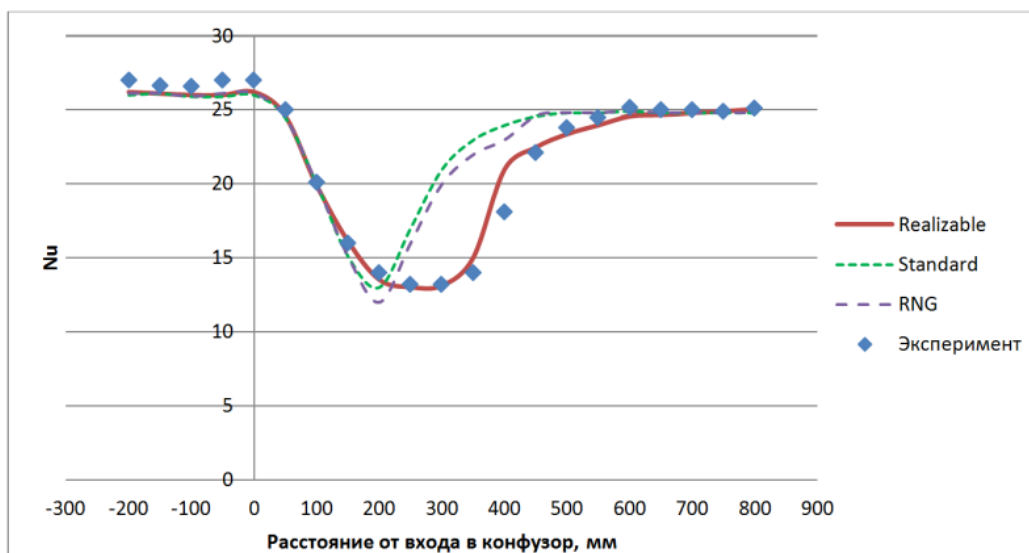
**Рис. 1 Деформация расчетных профилей кинетической турбулентной энергии в зависимости от расстояния от начала конфузорной секции при  $\beta=8/200$ ,  $Re=10000$ .**

***a* – standard  $k-\varepsilon$  модель, *б* – realizable  $k-\varepsilon$  модель**

Одним из параметров, способным дать представление о структуре турбулентного течения является кинетическая энергия турбулентности. Механизм изменения кинетической энергии вполне удовлетворительно в сравнении с данными эксперимента [4] предсказывается лишь моделью *realizable*.

В частности, можно заметить, что при входе в конфузорную секцию профиль удовлетворяет условиям развитого течения (сечение 0). Далее, проходя через конфузур, возникают особенности, вызванные ускорением потока вследствие увеличения поля давления и увеличением толщины вязкого подслоя. Это ведет к снижению пика кинетической энергии (смотри линии 100мм, 200 мм). Но, как известно, энергия никуда не исчезает и не появляется из ниоткуда, поэтому можно предположить, что здесь часть энергии турбулентности переходит в тепловую энергию среды. Затем, попадая в секцию постоянного сечения, наблюдается возрастание турбулентных пульсаций в потоке, и восстанавливается структура турбулентности (смотри линии 400мм, 600мм).

В качестве интегрального параметра, характеризующего тепловые процессы в среде, были рассчитаны значения критерия Нуссельта. Здесь *realizable k-ε* модель снова оказывается точнее. И данные, полученные на ее основе для малых значений тангенса угла сужения ( $\beta \leq 8/200$ ) практически повторяют результаты эксперимента [4]. Расчетами установлено, что при течении через конфузور наблюдается процесс гашения турбулентного переноса в радиальном направлении, вызванный ламинаризацией течения. А затем его восстановление на некотором расстоянии от конфузора.



**Рис. 2 Сравнение результатов расчета критерия Нуссельта по длине трубы для различных моделей турбулентности при  $\beta=8/200$ ,  $Re=10000$**

Как представляется возможным, такие результаты получены в силу более точного моделирования некоторых параметров потока *realizable* моделью. В частности, пульсационных составляющих скорости и турбулентной вязкости. Так, для *standard* и *RNG* моделей коэффициент турбулентной вязкости  $C_\mu$ , входящий в уравнения для вычисления турбулентной вязкости и пульсационных составляющих скорости, является эмпирически полученной константой, а для *realizable* – некоторой изменяющейся по пространству функцией, позволяющей учитывать в данном случае увеличивающуюся анизотропность процесса. Это приводит к тому, что *standard* и *RNG* модели предсказывают, что вклад пульсационных характеристик в  $k$  остается пропорционально постоянным. Но *realizable* модель показывает, что вклад их меняется, что также подтверждается результатами описанного в литературе реального эксперимента [3].

Однако при значениях  $\beta \geq 10/200$ , начинают наблюдаться расхождения с экспериментом в определении параметра Нуссельта. Основываясь на [2], можно предположить, что для расширения границ применения моделей необходимо использование функциональных зависимостей для определения числа Прандтля, учитывающих особенности его поведения как в ядре потока, так и в вязком подслое, такие как, например, зависимости Иевлева, Гешева и пр.

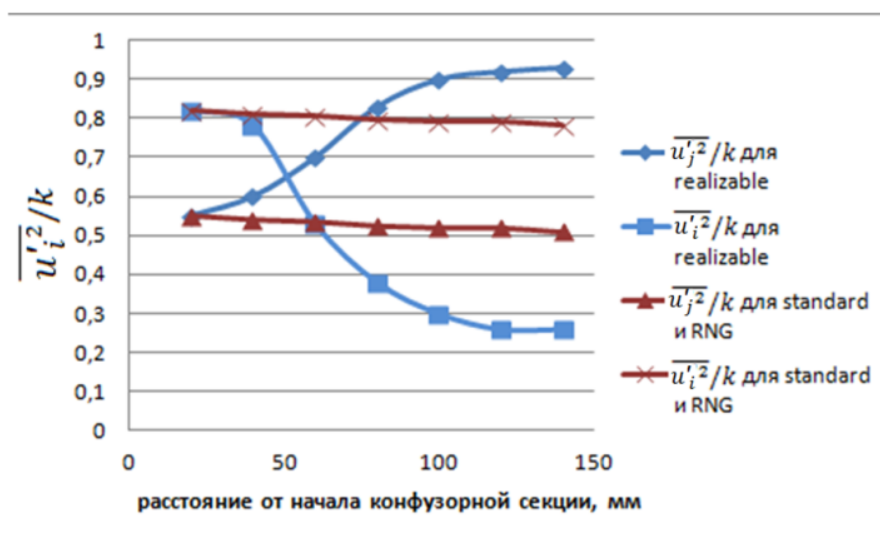


Рис. 3 Изменение значений пульсационных скоростей по длине конфузора на его оси ( $r/R(x)=0$ )

Все это в итоге позволит использовать в расчетах достаточно нетребовательные к вычислительным ресурсам полуэмпирические модели, широко опробованные к прогнозу задач нефтегазовой гидродинамики.

Выполнено при частичной поддержке гранта FP7-PEOPLE-2013-IIF, project #913974.

#### Литература

1. Агинея 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. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. - Томск: Изд-во ТГУ, 2001. – 448 с.
3. Ковальногов Н.Н. Прикладная механика жидкости и газа. – Ульяновск УлГТУ: 2010. – 219 с.
4. Танака Х., Кавамура Х., Татено А. 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 // Теплопередача (Труды американского общества инженеров-механиков). – 1982. – № 2. – С. 144–153.
5. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulence flows // Comput. Meth. Appl. Mech. Engng., 1974. – V.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. – V. 24. – P. 227.
7. Yachot V., Orszag S.A. Relaminarization group analysis of turbulence // J. Sci. Comput., 1986. – V. 1. – P. 1.