

На дифрактограммах образцов обнаружены дифракционные максимумы, принадлежащие минералам тоберморитовой группы ( $5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), кальциту ( $\text{CaCO}_3$ ) и портландиту ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Это указывает на высокую степень протекания синтеза, подтверждение который было необходимо для дальнейшего исследования в данной области. Помимо РФА, подтверждение протекания синтеза было выявлено при проведении ДТА (рис.2).

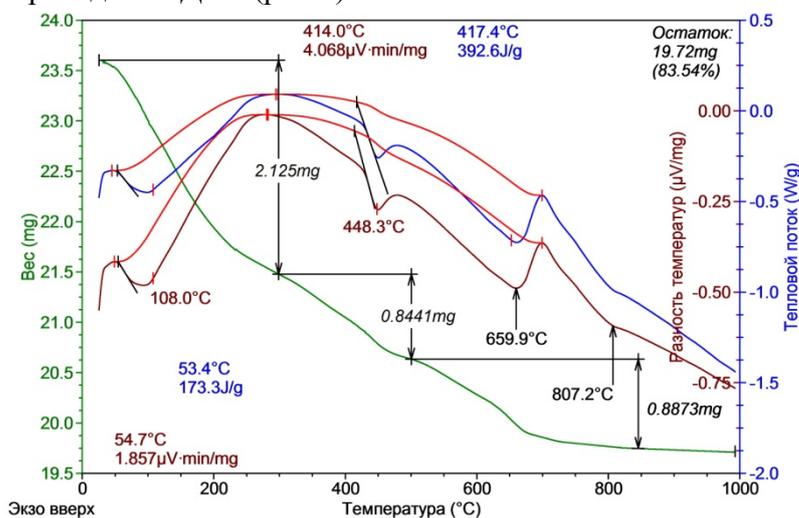


Рис. 2. Термограмма образца тоберморита, полученного из листового стекла

#### Выводы:

- Установлена принципиальная возможность получения из отходов листового стекла тоберморитовых сорбентов пригодных для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов
- Установлена возможность синтеза тоберморита из смеси вторичного лампового и листового стеклобоя, благодаря их схожему составу, что упрощает проведение синтеза с использованием отходов стекла

#### Список литературы:

1. Nichola J. Coleman. International Journal of Environment and Waste Management. 2011. Vol. 8, Нью 3 - 4. Р. 366-382.
2. Либау Ф. Структурная химия силикатов. М.: Мир, 1988. 412с.
3. Лебедева Е.Ю., Казьмина О.В. Синтез тоберморита на основе промышленного стеклобоя. Перспективы развития фундаментальных наук: Труды IX Междунар. конф. студентов и молодых учёных. – Томск, 2012. – С. 420–422.
4. Лебедева Е.Ю., Кобякова А.А., Усова Н.Т., Казьмина О.В. Синтез тоберморитового адсорбента для очистки воды // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Том 324, № 3. с.137–141.

#### Гидродинамика стационарных устойчивых течений углеводородных сред в трубопроводах сложной формы

Куделин Н.С.  
kudelin@tpu.ru

*Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор, Харламов С.Н., Национальный исследовательский Томский Политехнический Университет*

В настоящее время вопросам прогнозирования процессов, возникающих в трубопроводных системах, теплоэнергетических установках, работающих в условиях интенсивной нагрузки, уделяется большое внимание. Для оптимизации проектирования систем транспорта нефти и газа широко применяются методы численного моделирования, позволяющие получить детальную информацию о картине течения, эволюции процессов перераспределения энергии и массы в трубопроводе. Использование современных компьютерных технологий позволяет получить универсальный и эффективный инструмент при проектировании и экспериментальных исследованиях. Однако для достоверности результатов численного моделирования требуется их анализ на основе существующих законов физики и экспериментов. Вопросам, связанным со структурой течения, посвящено множество экспериментальных [1, 2] и расчетных работ [3-5].

Цель исследования заключается в: построении модели течения и расчете гидродинамики в сложных трубопроводах; уяснении особенностей течения в зонах отрыва и присоединения потока, выявлении проблем прогноза течений в пристеночных зонах ламинарного или турбулентного режимов течения; оценке достоинств RNG  $k-\varepsilon$  в сравнении с другими моделями турбулентности; выдаче рекомендаций в практику расчета гидравлического сопротивления с учетом деталей моделирования течения в условиях развития конвективно-диффузионных процессов.

В работе исследованы стационарные слабо сжимаемые изотермические ламинарные и турбулентные потоки в Т-образных соединениях трубопроводов. Предполагается, что поток отвечает условиям осевой симметрии во входном патрубке при отсутствии внешних сил (например, силы тяжести). Поток представляет собой химически инертную однородную капельную среду, эффект переменности теплофизических свойств опускается, так как температурный переход несущественен.

В данном случае система замыкающих уравнений для описания гидродинамики включает в себя следующие уравнения: неразрывности (1), Навье-Стокса (2, 3), энергии, представленное в форме Фурье-Остроградского (4) и состояния (5), и в цилиндрических координатах имеет следующий вид [4-6]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv) = 0; \quad (1)$$

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu r \frac{\partial u}{\partial r}); \quad (2)$$

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r}) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu r \frac{\partial v}{\partial r}); \quad (3)$$

$$\rho c_p(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r}) = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) + \mu \Phi_v, \quad (4)$$

где  $\Phi_v$  представляет собой диссипативную функцию Релея, остальные обозначения являются общепринятыми и подробно описаны в [4].

Стоит отметить, что при моделировании турбулентных потоков уравнения (1)-(4) представляют собой аналоги, усредненные по Рейнольдсу. Кроме того, в расчете

используется популярная двухпараметрическая RNG  $k - \varepsilon$  модель, позволяющая рассчитывать новые переменные (турбулентные потоки тепла  $\rho c_p \overline{u'_i t'}$  и напряжения Рейнольдса  $\overline{\rho u'_i u'_j}$ ). В частности, используемая RNG  $k - \varepsilon$  модель турбулентности представляется в индексной форме следующим образом [7]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

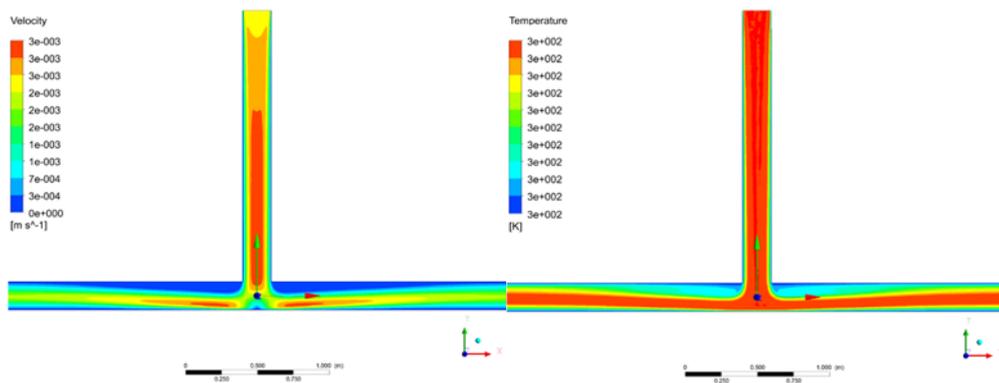
$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (6)$$

где  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$ ,  $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$  and  $S = (2S_{ij} S_{ij})^{1/2}$ .

Численное интегрирование системы замыкающих уравнений (1) – (6) модели турбулентности было осуществлено с помощью коммерческого пакета для вычислительной гидродинамики «Ansys FLUENT 16» (используя метод контрольного объема, алгоритм SIMPLE для расчета поля давления) [8]. Граничные условия для интегрирования уравнений (1) – (6) следующие: входной патрубков – известные параметры определяемых величин ( $u, v, T, k, \varepsilon$ ); выходной патрубков – “мягкие” граничные условия; на стенке – условие прилипания для скорости, граничные условия первого рода ( $T_w = const$ ) для температуры.

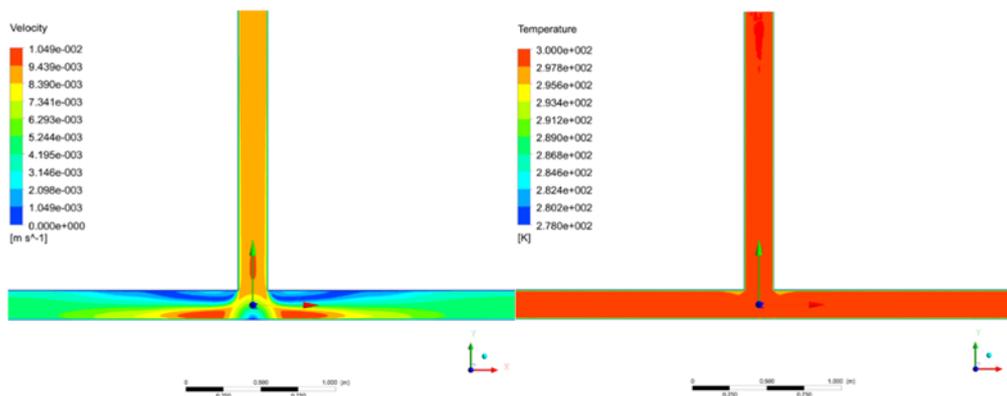
Расчет был осуществлен в следующих диапазонах характеристик:  $D_i = 0,1 \div 0,4$ , м; где  $i = 1, 2, 3$  - номер входного патрубка (1), выходного патрубка слева (2) и справа (3) в тройнике;  $x_i = (30 \div 160) D_i$ , м – длина участка трубы;  $Re = 50 \div 50000$ ;  $\Delta T \approx T_w - T_0$  - около 10 К,  $T_0 = 300$  К. Параметры турбулентности задавались  $Tu = 0,1 \div 10\%$ , где  $Tu$  - интенсивность турбулентности.

Детальные расчеты локальной скорости и температуры в трубопроводе с тройником приведены на рис. 1 (для ламинарного режима течения) и на рис. 2 (турбулентный режим). Результаты показывают, что эффекты перераспределения энергии оказывают существенное влияние на динамику потока. Приобретенный опыт моделирования гидродинамики и теплообмена соответствует результатам [9, 10].



а) б)

Рисунок 1. а) Спектр поля скорости, б) спектр температуры для воды ( $Re=500$ )



а) б)

Рисунок 2. а) Спектр поля скорости, б) спектр температуры для воды ( $Re=50000$ )

Зоны интенсивной рециркуляции потока, размеры которых зависят от деталей входящего потока, влияющие на интегральные параметры, обнаружены [11]. В частности, как видно из рисунка 2а, существует зона с рециркуляционным потоком в зоне разделения, что приводит к специфическим распределениям  $c_f$ . На рисунке 3 представлено распределение коэффициента трения Фаннинга на нижней стенке тройника для ламинарного и турбулентного режимов течения. Стоит заметить, что течение стабилизируется в боковых патрубках к существующим закономерностям [12].

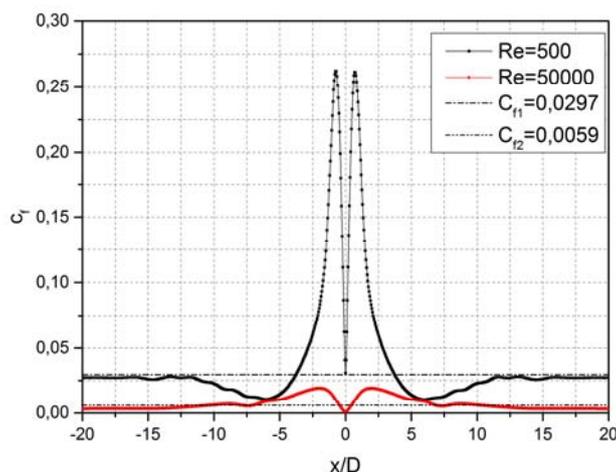


Рисунок 3. Коэффициент трения Фаннинга на нижней стенке тройника

В заключение необходимо отметить, что движению потоков в сложных соединениях трубопроводов сопутствует значительно неоднородные изменения пульсационной скорости потока. Наш опыт показывает, что модели турбулентности с транспортными уравнениями для тензора напряжений Рейнольдса могли бы быть более гибким инструментом для прогнозирования изменений структуры потока [9, 11].

#### Список литературы:

1. Poole R.J., Escudier M.P. Turbulent flow of viscoelastic liquids through an axisymmetric sudden expansion // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2004. Vol. 117. № 1. P. 25–46.
2. Al-Wahaibi T. и др. Experimental investigation on flow patterns and pressure gradient through two pipe diameters in horizontal oil–water flows // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2014. Vol. 122. P. 266–273.
3. Kharlamov S. Actual Problems of Hydrodynamics at Internal Not-Isothermal Flows in Fields of Mass Forces // *Hydrodynamics: Theory and Model*, Intech-Open, Rijeka, Croatia, 2012. P. 183–223.
4. Bornschlegell A.S. et al. Thermal optimization of a single inlet T-junction // *International Journal of Thermal Sciences*. 2012. Vol. 53. P. 108–118.
5. Marusic I. et al. Wall-bounded turbulent flows at high Reynolds numbers: Recent advances and key issues // *Physics of Fluids (1994-present)*. 2010. Vol. 22, № 6. P. 065103.
6. El Gharbi N., Absi R., Benzaoui A. Numerical investigation toward improving heat-transfer predictions in a turbulent channel flow // *International Journal of Thermal Sciences*. 2013. Vol. 70. P. 10–16.
7. Yakhot V. et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique // *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)*. 1992. Vol. 4, № 7. P. 1510–1520.
8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. Vol. 152.
9. Kharlamov S. N., Alginov R. A., Specific Aspects of Turbulent Flow Separation in Nods and Junctions of Pipelines // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014. Vol. 21, № 1. P. 012038.

10. Matos H. M., Oliveira P. J., Steady flows of constant-viscosity viscoelastic fluids in a planar T-junction // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2014. Vol. 213, P. 15–26.
11. Kharlamov S.N., Kudelin N.S., Dedeyev P.O. Hydrodynamic, Heat and Acoustic Processes Modelling in Transport of Rheologically Complex Viscous Media Technology in Pipelines // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2014. Vol. 21, № 1. P. 012040.
12. Ismail L. S., Velraj R., Studies on Fanning Friction (f) and Colburn (j) Factors of Offset and Wavy Fins Compact Plate Fin Heat Exchanger—A CFD Approach // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2009. Vol. 56 № 12, P. 987–1005.

### **Очистка модельных вод от ионов никеля термически обработанной шелухой пшеницы**

Назаренко А.А.  
alesia1509@mail.ru

*Научный руководитель: к.т.н., доцент, Степанова С.В., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», кафедра «Инженерная экология»*

Соединения никеля в водные объекты поступают со сточными водами цехов никелирования, заводов синтетического каучука, никелевых обогатительных фабрик. Значительные выбросы никеля сопровождают сжигание ископаемого топлива. Никель принадлежит к числу канцерогенных элементов и способен вызывать респираторные заболевания. Считается, что свободные ионы никеля ( $\text{Ni}^{2+}$ ) примерно в два раза более токсичны, чем его комплексные соединения [1]. Попадая в окружающую среду, никель существенно влияет на численность, видовой состав и жизнедеятельность почвенной микробиоты. Он ингибирует процессы минерализации и синтеза различных веществ в почве, подавляет дыхание почвенных микроорганизмов, способствует появлению мутагенных свойств [2].

Для удаления ионов никеля из растворов используют такие методы, как реагентная обработка, ионный обмен, физико-химические методы, мембранные методы. Но наиболее простыми, менее дорогостоящими, доступными и эффективными являются сорбционные методы очистки [3]. Сорбционное извлечение металлов из сточных вод получило широкое распространение вследствие высокой эффективности и отсутствия вторичных загрязнений. Сорбционные материалы поглощают из водных растворов металлы практически до любых остаточных концентраций. В связи с этим встает вопрос о поиске новых эффективных экологических сорбентов с низкой стоимостью на рынке [4]. Наиболее часто для доочистки воды и глубокой очистки от ионов металлов используются активированные угли различных марок. Они являются наиболее удобными для сорбционной очистки, так как легко крошатся на очень мелкие кусочки, которые не ядовиты и безвредны для здоровья человека [5]. Активированные угли особо эффективны за счет своей структуры: в них присутствуют микропоры и субмикропоры, величина которых зависит от того, какой тип сырья выбран, а также от процесса активации [6]. В настоящее время уделяется большое внимание производству угля из дешевого, практически бросового,