

6. Breuer R. Praxisprobleme des deutschen Wasserrechts nach der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie // *Natur und Recht*. 2007. № 8. S. 503–513.
7. Окуньков. Л.А. Основной закон Федеративной Республики Германии // Федеративная Республика Германия. Конституция и законодательные акты. Пер. с нем. / Под ред. Ю.П. Урьяса. – М.: Прогресс, 1991. – Приводится по: Конституции государств Европейского Союза / Под общей редакцией Л.А. Окунькова. – М.: Издательская группа ИНФРА-М –НОРМА, 1997. – С. 181–234.
8. "Конституция Российской Федерации" (принята всенародным голосованием 12.12.1993) (с учетом поправок, внесенных Законами РФ о поправках к Конституции РФ от 30.12.2008 N 6-ФКЗ, от 30.12.2008 N 7-ФКЗ) // «Рос. газета», № 7, 21.01.2009

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА НЕФТЕПРОДУКТОВ В ТРУБОПРОВОДАХ**

Куделин Н.С., Дедеев П.О., Урустемов Н.Н.  
E-mail: kudelin@tpu.ru

*Научный руководитель: доктор физико-математических наук, академик РАН, Харламов С.Н., профессор кафедры ТХНГ ИПР НИ ТПУ*

Настоящая статья имеет цель накопления знаний о природе вихревых течений и особенностях процессов переноса тепла, массы и импульса, а также и способах их математического моделирования. Такие сведения полезны в решении проблем разработки газоконденсатных месторождений, в проектировании металлоемкого и высокоэффективного оборудования по транспортировке сырья, снижения потерь на трения и теплоотдачу, что определяет актуальность рассматриваемых задач о комплексном физико-математическом моделировании вибро-акустических и гидродинамических процессов в трубопроводах, о моделировании движения неньютоновских жидкостей и движения углеводородной среды в круглых каналах сложной пространственной конфигурации.

В силу вышеупомянутого, достижение поставленной цели сводится к решению следующих задач:

1. Детально проанализировать имеющийся библиографический опыт по конкретной тематике;
2. Использовать статические модели второго порядка для предсказания или моделирования процессов движения неньютоновских жидкостей, движения углеводородных сред в круглых каналах сложной пространственной конфигурации и комплексных процессов виброакустики и гидравлики;
3. Определить достоинства статистических моделей «напряжения-поток».

### **Гидродинамика и теплообмен в условиях установившегося неньютоновского течения нефтепродуктов в трубопроводах**

Как показывают многочисленные исследования [1,2], особенность неньютоновских течений определяется специфическим характером изменения поля скорости, температуры по всей длине трубопровода. В случае, если течение существенно неизотермично, для достаточного его описания требуются эффективные методы числового моделирования пространственных процессов переноса импульса и тепла [3,4]. Учитывая эти обстоятельства, а также затраты на реализацию модели, привлекательным представляется использование дифференциальной модели для замыкания систем определяющих уравнений гидродинамики и теплообмена.

В данной статье рассматриваются турбулентные неизотермические течения в трубопроводах. Для иллюстрации математической модели ниже представлена система определяющих уравнений к описанию усредненных и пульсационных процессов. При моделировании турбулентных процессов используются современные статистические модели «напряжения-поток». Детали численного

решения достаточно полно представлены [3], причем для простоты записи уравнений для напряжений ( $\overline{u_i' u_j'}$ ), потоков тепла ( $\overline{u_i' t'}$ ), кинетической энергии турбулентности ( $k$ ), времени пульсаций динамического поля ( $\tau$ ) в турбулентном течении используется индексная форма (1-4). Здесь общепринятые обозначения (полно представленные в [3]).

$$\begin{aligned} \frac{D(\overline{u_i' u_j'})}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left[ \left( \nu + c_{\mu_1} f_\mu \overline{u_i' u_j' \tau} \right) \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_\alpha} \right] - \frac{d_2}{\tau} \left( \overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) \\ & - d_3 \nu \frac{\overline{u_i' u_j'}}{\tau^2 k} - \frac{2}{3} d_4 \frac{k}{\tau} \delta_{ij} + P_{ij} - \frac{\partial \nu}{\partial x_\alpha} \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_\alpha}; \end{aligned} \quad 1)$$

$$\begin{aligned} \frac{D(\overline{u_i' t'})}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left[ \left( \nu + \frac{a - \nu}{n_1 + 2} + c_{\mu\theta} f_{\mu\theta} \overline{u_i' u_j' \tau} \right) \frac{\partial \overline{u_i' t'}}{\partial x_\alpha} \right] - \frac{c_2}{\tau} \overline{u_i' t'} \\ & - c_3 (\nu + a) \frac{\overline{u_i' t'}}{l_{u_i' t'}^2} - \overline{u_i' u_\alpha'} \frac{\partial T}{\partial x_\alpha} - \overline{u_i' u_\alpha'} \frac{\partial U_i}{\partial x_\alpha} - \frac{\partial \nu}{\partial x_\alpha} \frac{\partial \overline{u_i' t'}}{\partial x_\alpha}; \end{aligned} \quad 2)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left[ \left( \nu + c_{\mu_2} f_\mu \overline{u_i' u_j' \tau} \right) \frac{\partial k}{\partial x_\alpha} \right] - c_{kl} \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{k}{\tau}; \quad 3)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\tau}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + c_{\mu_2} f_\mu \overline{u_i' u_j' \tau} \right) \frac{\partial \tau}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{\tau} \left( \nu + c_{\mu_2} f_\mu \overline{u_i' u_j' \tau} \right) \frac{\partial \tau}{\partial x_i} \frac{\partial \tau}{\partial x_i} \\ & + (c_{\varepsilon_2} f_2 - 1) - (1 - c_{\varepsilon_1}) \frac{\tau}{k} \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{2}{k} \left( \nu + c_{\mu_2} f_\mu \overline{u_i' u_j' \tau} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \tau}{\partial x_i}. \end{aligned} \quad 4)$$

Численное решение такой задачи строится с использованием неявных конечно-разностных схем, схем расщепления по пространственным переменным с последующим применением метода прогонки. Аппроксимация производных 2-го порядка точности относительно шагов  $\Delta x$ ,  $\Delta t$ . В определении поля давления используется обобщенный метод Симуни Л.М. [5], позволяющий успешно рассчитывать внутренние ньютоновские и неньютоновские потоки. Результаты исследования гидродинамики и теплообмена в трубопроводах показывают, что сформулированная модель турбулентности может успешно предсказывать изменения в тепловой и динамических структурах потока [6].

#### **Исследование нелинейных взаимодействий акустических и гидродинамических пространственных процессов в трубопроводах сложной формы в режимах их возбуждения**

Создание нового энергоэффективного оборудования в нефтегазовой отрасли требует увеличения ресурса его функционирования и ведет к необходимости повышения прочности и надёжности трубопроводов. В таких условиях стоит задача комплексного физико-математического моделирования гидродинамических и виброакустических процессов в трубопроводах сложной формы в условиях сильного возбуждения пульсациями течения вязкой углеводородной жидкости, решение которой приведёт к возможности расчета прочностных характеристик, необходимых для корректного проектирования линейной части нефтегазопроводов и предотвращения аварийных ситуаций.

Старение системы магистральных нефтепроводов требует более детального изучения влияния изменения “тонких” параметров среды на возбуждение трубопровода. Вопросы такого возбуждения для трубопроводной системы рассмотрены достаточно полно, детальный анализ представлен в [7]

Заметим, что в [8] представлено дифференциальное уравнение прогибов оси трубопровода при поперечных вибрациях:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = P - N \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial x} - y \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}, \quad (5)$$

где  $E$  - это модуль упругости,  $I$  - момент инерции сечения относительно нейтральной оси,  $y$  - прогиб трубопровода,  $M$  - изгибающий момент,  $N$  - продольной сжимающей силы,  $P$  - нагрузка на единицу длины.

В рамках допущений об одномерном характере течения вязкой среды, данное уравнение сводится к виду, готовому для параметрического анализа [8]:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + a_{10}(x,t) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + a_{20}(x,t) \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} + a_{30}(x,t) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + a_{40}(x,t) \frac{\partial y}{\partial x} + a_{50}(x,t)y - a_{30}(x,t)g = 0; (6)$$

где выражения  $a_{i0}$  - известные функции ряда определяющих процесс параметров. Стоит заметить, что расчет в аналитическом виде такой системы сложен и неперспективен для инженерных приложений [Дедеев, Харламов].

На текущий момент выполнено обобщение (6) на учет пространственного характера изменения поля скорости, полученного из решения многомерной гидравлической задачи о сложном сдвиговом течении углеводородной среды в трубопроводе. Причем в турбулентном режиме структура потока предсказывалась на базе  $k-L$  и  $k-\omega$  двух параметрических моделей Глушко-Уилкокса [9]. Результаты расчета показывают, что в условиях развивающихся течений конвективно-диффузионные механизмы изменения поля скорости вызывают интенсификацию акустических процессов в трубопроводе. Об этом свидетельствуют распределения компонент вектора скорости на участках развивающихся процессов. Также в работе выясняются детали изменения структуры потока в зонах криволинейной стенки.

Заметим, что при построении численных решений системы определяющих уравнений взаимодействия акустических и гидродинамических процессов используется метод конечных разностей с аппроксимацией производных по пространственным координатам со второй степенью точности. В определении поля давления используется обобщенный алгоритм Л.М. Симуни [3].

Полученные результаты могут служить основой для совершенствования модели напряжений RSS (Reynolds Shear Stresses) [3] в расчетах нелинейных акустических и гидродинамических процессов, которая может быть сведена к алгебраической модели с учётом эффектов сопряжения теплообмена.

Результаты исследования указывают на успешное выполнение упомянутых выше задач: проведение детального анализа имеющегося библиографического опыта; использование статических моделей второго порядка для предсказания и моделирования процессов движения неньютоновских жидкостей, движения углеводородных сред в круглых каналах сложной пространственной конфигурации и комплексных процессов виброакустики и гидравлики; определение достоинств статистических моделей "напряжения-потоки".

Перспективным представляется разработка алгебраических моделей теплообмена при ламинарном или турбулентном течениях для сопряжения с уже выполненными расчетами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. S.N.Kharlamov, R.E.Tereschenko. Heat transfer in laminar non-Newtonian flow through circular pipes // Proceedings of IFOST 2013: The 8th International Forum on Strategic Technology 2013, Pages 720-721;
2. S.N. Kharlamov, R.A. Alginov, R.E. Tereschenko and S.A. Pavlov. Closure Models for RANS and Wall Modelling of Turbulent Shear Flows in Power Systems // Proceedings of IFOST 2013: The 8th International Forum on Strategic Technology 2013, Pages 714-719;
3. Харламов С.Н и др. Математические модели течения и теплообмена во внутренних задачах динамики вязкого газа. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1993. - 187с.
4. J. Laufer. The structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow // NASA. -1954. Rep. 1174. P. 1-18;
5. Симуни Л.М. Численное решение задачи при неизотермическом движении вязкой жидкости в плоской трубе// Инженерно – физический журнал 1966. Т10. No1, с. 86- 91.
6. Харламов С.Н., Терещенко Р.Е., Куделин Н.С. Гидродинамика и теплообмен в условиях установившегося неньютоновского течения нефтепродуктов в трубопроводах //Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов,

посвященной 50-летию создания Тюменского индустриального института. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. - с. 244-248.

7. Харламов С.Н., Дедеев П.О. Исследование нелинейных взаимодействий акустических и гидродинамических пространственных процессов в трубопроводах сложной формы в режимах их возбуждения // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, посвященной 50-летию создания Тюменского индустриального института. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. - с. 241-244.

8. Канторович Л. В., Крылов В. И. Приближённые методы высшего анализа. — 5-е изд. — Л.-М.: Физматлит, 1962. — 708 с.

9.. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Наука, 1994, 400 с.

## **ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РАЙОНЕ С. БАКЧАР**

Моисеева Ю.А.

E-mail: julchiky@mail.ru

*Научный руководитель: доцент, кандидат географических наук, М.В. Решетько, доцент  
кафедры ГИГЭ ИПР НИ ТПУ*

Развитие климатологии во второй половине XX в. показало, что климат не постоянен. Изменения климата происходят как под действием естественных причин, так и вследствие антропогенного воздействия на климатическую систему. Наблюдаемая изменчивость метеорологических величин сопровождается аномалиями погоды, т. е. ненаправленными отклонениями от постоянных климатических средних значений.

**Актуальность:** В связи с глобальным изменением климата, который отмечен и в Западной Сибири возникает необходимость установить, насколько проявились изменения климата в районе с. Бакчар и как это скажется на величине водного стока.

### **Задачи:**

- вычисление характеристик и выявление изменений метеорологических величин с помощью статистического анализа
- оценка влияния изменений климатических параметров на водный сток.

В ходе исследования проведен статистический анализ данных климатических параметров и с помощью математической модели формирования водного стока выделены предполагаемые изменения гидрологических условий в исследуемом районе.

Материалом послужили специализированные массивы, как месячных, так и срочных данных [5] температуры воздуха, атмосферного давления, количества атмосферных осадков, упругости водяного пара, средней скорости ветра и продолжительности солнечного сияния метеостанции с. Бакчар за период с 1972 по 2008 гг.

В результате проведенного статистического анализа данных выявлено повышение среднегодовой температуры воздуха на 1,8°C в период с 1970 по 2008 гг (Рис. 1) и увеличение упругости водяного пара среднегодовых значений на 0,67 гПа (Рис. 2), особенно в зимние (0,53 гПа) и летние (1,39 гПа) времена года.