

## ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПОТОКАХ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ВО ВНУТРЕННИХ СИСТЕМАХ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ МОЛЕКУЛ

Дедеев П.О<sup>1</sup>., Amati G<sup>2</sup>.

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. С.Н. Харламов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия

<sup>2</sup> Politecnico di Torino, Italia

Эффект снижения турбулентного трения в жидкостях известен как эффект Томса, и его причиной служат противотурбулентные присадки – смесь длинных полимерных цепочек и специального растворителя. Из-за воздействия на трение эффект Томса нашел множество применений в промышленности, несмотря на отсутствие подходящей математической модели для описания взаимодействия потока жидкости с полимерными цепочками.

Впервые эффект Томса наблюдался в 1948, когда Б. Томс экспериментально наблюдал увеличение пропускной способности трубы на 30% при введении в поток раствора полимера [1]. Затем Дж. Ламли и П. Вирк продолжили исследования [7,12], в результате которых стало очевидно, что численное моделирование эффекта Томса – вопрос выбора подходящей модели турбулентности. В то же время, промышленные компании активно использовали противотурбулентные присадки в трубопроводных транспортных системах, хотя и расчеты велись преимущественно в эмпирической постановке. Таким образом методы эмпирического расчета стали повсеместными и широко используются в исследованиях [4].

Хотя развитие вычислительных мощностей позволяет использовать методы DNS и LES., алгебраические модели турбулентности могут быть полезными в инженерном моделировании, так как они предоставляют большую гибкость в сравнении с эмпирическими моделями. Например, Ф. Кунха и М. Андреотти разработали турбулентную модель [5] на основе предпосылок Прандтля, но всё же имеется значительное число других алгебраических моделей, которые точнее рассчитывают физические эффекты в гидродинамике. Один из способов выделить границы применения тех или иных алгебраических моделей – исследовать поведение турбулентной вязкости. Таким образом, цель настоящего исследования состоит в изучении поведения турбулентной кинетической энергии и турбулентной вязкости.

### Методы и экспериментальные данные

Основой для расчетов послужили опыты Д. Молва и Х. Карамии [9] и Ф. Кунха [5], которые обобщены и представлены авторами настоящей статьи на Рисунках 1 и 2.

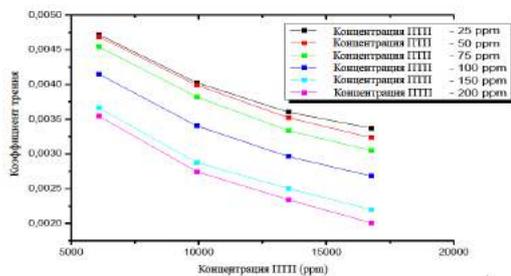


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения Фаннинга от числа Рейнольдса в потоках нефти с разными концентрациями ПТП, согласно данным [9].

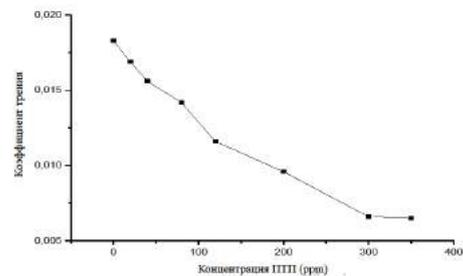


Рис. 2. Коэффициент Дарси-Вейсбаха для потока воды как зависимость от концентрации ПТП (ppm), согласно данным [5].

Следует отметить, что на Рисунке 1 эксперименты оперируют с коэффициентом Фаннинга, а на Рисунке 2 – коэффициент Дарси-Вейсбаха. Оба коэффициента выражают связь между силами давления и трения, но коэффициент Фаннинга меньше в 4 раза.

Для вывода эмпирических связей необходимо произвести расчет кинетической энергии турбулентности (КЭТ), чтобы затем на основе размеров вихрей вывести уравнение для турбулентной вязкости. КЭТ ( $k$ ) можно посчитать следующим образом:

$$k = 2 \cdot \left( \overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2} \right)$$

Здесь  $\overline{(u')^2}, \overline{(v')^2}, \overline{(w')^2}$  – компоненты энергии пульсации проекций скорости в потоке жидкости. В простом стабилизированном турбулентном потоке главная энергетическая составляющая приходится на первую компоненту, а энергия второй и третьей примерно равны и много меньше первой компоненты. Такое допущение позволяет посчитать КЭТ.

Обсуждение полученных результатов

Затем авторами настоящей статьи были построены распределения КЭТ по времени для того, чтобы визуальным образом показать подавление пульсаций в потоке с ПТП. Хорошо известно, что добавление полимерных цепочек вызывает механическое перераспределение энергии в потоке для радиальной и аксиальной компонент поля скорости.

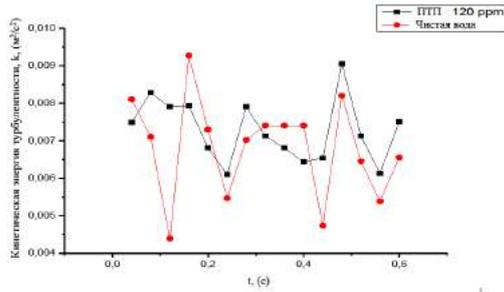


Рис. 3. Распределение КЭТ по времени для потока вязкой жидкости (воды) с ПТП (концентрация – 120 ppm) и для воды без ПТП (красная линия).

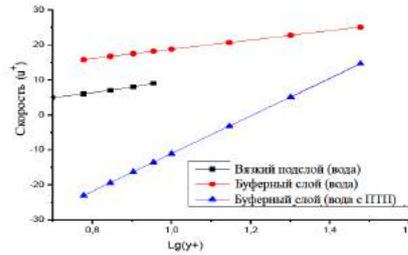


Рис. 4. Структура потока жидкости и профиль скорости в районе стенки трубы, здесь представлены классический закон стенки и модифицированное уравнение для буферной зоны потока. Построено согласно данным [6].

Турбулентная природа вязкого потока проявляется в вихревых образованиях, которые вызывают сдвиг в общей кинетической энергии потока. Анализ КЭТ показывает, что энергия пульсирует из-за постоянных распадов и зарождений вихрей, что наглядно видно на Рисунке 9. После инъекции ПТП в поток происходит подавление пульсаций (см. черную линию), распределение энергии становится более сжатым и компактным.

Структура турбулентного потока в трубах была детально изучена Laufer J [8], но в случае с потоком с ПТП профиль скорости – это тема дальнейшего исследования, так как происходят значительные изменения в буферной зоне потока – она становится больше в размерах, и не совсем ясно, какие же процессы происходят с вязким подслоем. В целом, профиль скорости становится более ламинаризованным.

В сравнении с водой без ПТП инъекция раствора полимеров вызывает значительные падения коэффициента трения – ПТП с концентрацией 100 ppm вызывает 20% падение трения в потоке [9]. Но на данный момент информация о кинетической энергии турбулентности неполная – необходимы пространственные распределения для того, чтобы построить зависимость для турбулентной вязкости.

#### Заключение

Эффект Томса – эффективный способ снизить воздействие сил турбулентного трения в вязких жидкостях во внутренних системах, но требуется исследование математических моделей для моделирования данного эффекта. Некоторые успешные попытки моделировать эффект Томса [5] имеются, но всё еще не завершены. Наблюдается недостаток экспериментальной информации о турбулентной вязкости и кинетической энергии турбулентности, ввиду чего на данный момент нет возможности судить о границах применения тех или иных алгебраических моделей.

Дальнейшие исследования должны включать в себя моделирование взаимодействий между противотурбулентными присадками и вязким потоком на основе математической модели, представленной в [11]. Также необходимо оценить границы применения моделей на основе неявно заданных функциональных зависимостей [4].

#### Литература

1. Toms B A 1949 Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers In Proceedings of the 1st International Congress on Rheology (North Holland, Scheveningen, 21–24 September 1948) 2 135–41
2. Abdul-Hadi A A and Khadom Anees A. 2013 Studying the Effect of Some Surfactants on Drag Reduction of Crude Oil Flow Chinese Journal of Engineering 1–6.
3. Bogdevičius M et al 2013 Mathematical modeling of oil transportation by pipelines using anti-turbulent additives Journal of Vibroengineering 15 419.
4. Kharlamov S et al 2015 Suppression of flow pulsation activity by relaxation process of additive effect on viscous media transport IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1–6.
5. Cunha F R and Andreotti M 2007 A Study of the Effect of Polymer Solution in Promoting Friction Reduction in Turbulent Channel Flow Journal of Fluids Engineering 129(4) 491–505.
6. Brostow W. 2008 Drag reduction in flow: Review of applications, mechanism and prediction Journal of Industrial and Engineering Chemistry 14 409–416.
7. Lumley J F 1969 Drag reduction by additives Fluid Mechanics 1 367–384
8. Laufer J 1954 The structure of turbulence in fully developed pipe flow NACA Technical Report (Washington, DC, USA) 1174 1–18
9. Karami H R and Mowla D 2012 Investigation of the effects of various parameters on pressure drop reduction in crude oil pipelines by drag reducing agents Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 177–178 37–45.
10. Shvab A V et al 2009 Hydrodynamic simulation of non-Newtonian fluid on the basis of differential rheological model Izvestiya vyshikh uchebnih zavedeniya. Fizika 7/2 210–215.