

## ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГИИ И ОСВОЕНИЯ НЕДР

$$F_{\mu} = 4 \cdot \pi \left( \frac{1 + 3 \cdot \frac{\tilde{\mu}}{2}}{1 + \tilde{\mu}} \right) \cdot \mu_0 \cdot r \cdot v \quad (1)$$

где  $\tilde{\mu}$  – отношение вязкости капли к непрерывной фазе;  
 $\mu_0$  – вязкость непрерывной фазы;  
 $v$  – скорость капель.

**Заключение.** Были построены зависимости время формирования слоя от различных межфазных натяжений. Установлено, что по сравнению с эффектами интенсивности звука, размерами капель и вязкостью масла, межфазное натяжение масло/вода мало влияет на время формирования полосы.

Таким образом, диапазон интенсивности звука, при котором может образоваться полоса капель, увеличивается с увеличением частоты. Кроме того, существует максимальная допустимая акустическая интенсивность для формирования полосы, которая также увеличивается с увеличением частоты. Для эмульсии W/O с небольшим SMD капель и высокой вязкостью масла требуется долгое время для формирования капель. Массовое межфазное натяжение мало влияет на время формирования полосы. Интервал полос связан только с частотой, которая примерно соответствует половине длины волны.

## Литература

1. Mathew B., Alazzam A., El-Khasawneh B., Maalouf M., Destgeer G., Sung H.J., Model for tracing the path of microparticles in continuous flow microfluidic devices for 2D focusing via standing acoustic waves, Sep. Purif. Technol. 153 (2015) 99-107.
2. Pangu G.D., Acoustically aided coalescence of droplets in aqueous emulsions, Case Western Reserve University, 2006.
3. Bruus H., Acoustofluidics 1: Governing equations in microfluidics, Lab Chip 11 (2011) 3742-3751.
4. Lamb H., Hydrodynamics (Sixth edition), Cambridge University Press, London (1932).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ В НЕСЖИМАЕМЫХ ПОТОКАХ В ТРУБОПРОВОДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПК ANSYS FLUENT. КАРТИНЫ ПРОЦЕССОВ

Р.С. Быков

Научный руководитель – профессор С.Н. Харламов

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

С развитием сложных современных методов исследования вихреобразования, таких как измерение скорости потока с помощью высокоскоростных вычислений, визуализация потока высоких скоростей, вихревая динамика, образующаяся за телом обтекания, исследуется довольно тщательно, что приводит к множеству полезных количественных и качественных заключений.

Для составления более полной картины формирования вихревых структур в канале с цилиндрическим телом обтекания, получения количественных характеристик полей скорости и давления и их пульсаций было выполнено численное моделирование исследуемого течения в пакете Ansys Fluent 13.0.

Физическая постановка задачи заключается в задании плоского канала, размеры которого равны 0,7×1,2 м. Внутрь канала помещаем цилиндр, радиус которого равен  $r = 0,04$  м. Расположение осей цилиндра является перпендикулярным плоскости течения.

Движение потока жидкости в исследуемом канале описывается системой уравнений динамики вязкой жидкости, где для привлечения поля скорости используется уравнение Навье-Стокса в безразмерном виде:

$$Sh \operatorname{Re} \frac{\partial U}{\partial t} + \operatorname{Re}(U, \nabla)U = -\operatorname{Re} E \nabla P + \frac{\operatorname{Re}}{Fr} F + \Delta U,$$

При исследовании обтекания покоящейся цилиндра радиуса  $d$ , с центром, находящимся в начале системы координат, потоком жидкости, который имеет на бесконечности скорость  $U$ , следует установить следующие граничные условия соответственно на поверхности цилиндра, а также на бесконечности:

$$\begin{aligned} r = d, \quad u = v = w = 0, \\ r = \infty, \quad u \rightarrow U, v \rightarrow 0, w \rightarrow 0. \end{aligned}$$

На поверхности цилиндра установлены условия прилипания. На нижней и верхней границах расчётной области заданы условия непротекания, при которых нормальная компоненты скорости равняется нулю.

Исследовалось развитие разных режимов течения в зависимости от задания  $\operatorname{Re}$ . Выполняется сравнение полученных результатов расчетов с картинами течения, представленных в альбоме течений жидкости и газа.

За счёт изменения скорости набегающего потока производилась вариация числа  $\operatorname{Re}$ . Температура для среды предполагалась постоянной на протяжении всего времени. Модель турбулентности  $k - \omega$ -SST [1] применялась для замыкания осреднённых уравнений. С целью аппроксимации производных по пространственным переменным использована конечно-объёмная MUSCL схема второго и третьего порядка аппроксимации [2]. В результате моделирования были получены все характерные режимы обтекания кругового цилиндра.

Для малых чисел Рейнольдса ( $\operatorname{Re} < 1$ ) обтекание кругового цилиндра идет в ламинарном режиме. Картина направлений линий тока для числа Рейнольдса равным 0.16 позволяет определить, что поток движется слева направо.

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

Данный факт объясняется тем, что при числах Рейнольдса близких к единице обтекание твердого тела «обратимо» и, вследствие этого, симметрично при симметричной форме тела.

Нарушение устойчивости ламинарного потока происходит начиная с  $Re = 1$  и вплоть до значения  $Re = 40$ . В этом случае за телом обтекания формируются два вихря, тем не менее течение остается ламинарным и стационарным. В противоположность предшествующему случаю на рисунках отчетливо видно, что произошел отрыв потока, и сформировалась пара рециркуляционных вихрей. Приближенные результаты аналогичных экспериментов в случае неограниченного потока указывают на возможность отрыва потока при  $Re = 4 \div 5$ , в то время как большая часть численных расчетов дает  $Re = 5 \div 7$ .



**Рис. 1** Распределение линий тока при  $Re = 9.6$  (а), картина течения в области кругового цилиндра при  $Re > 10$  (б) [4]

Неподвижные вихри по мере увеличения скорости начинают вытягиваться в направлении движения потока (рис.2). Выявлено, что их длина с ростом числа Рейнольдса линейно увеличивается, пока течение при значении Рейнольдса, превышающем 40, не станет неустойчивым. Расстояние до центров вихрей вниз по потоку в свою очередь также возрастает с увеличением числа  $Re$ .



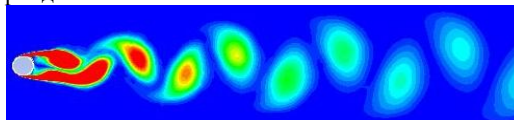
**Рис. 2** Изменение линий тока при  $Re = 26$  (а), картина течения в области кругового цилиндра при  $10 < Re < 40$  (б) [4]

Описанное выше стационарное движение с формированием в задней области течения системы из двух симметричных вихрей при условии увеличения числа Рейнольдса ( $Re > 50$ ) теряет свою устойчивость (рис.3). В этом случае один из вихрей начинает удлиняться, отрывается и сносится вниз по потоку жидкости. Далее удлиняется и отрывается другой вихрь.



**Рис. 3** Мгновенные линии тока при  $Re = 100$  (а), распределение модуля скорости (б)

На месте оторвавшихся вихрей появляются поочередно снизу и сверху новые вихри, которые также аналогичным образом отрываются от поверхности цилиндра и уносятся потоком. Возникает процесс взаимодействия отрывающихся вихрей. Данный режим неустойчивости образуется в большинстве случаев. В результате него формируется так называемая вихревая дорожка Кармана (рис. 4), движение потока становится нестационарным, но вместе с тем периодическим.



**Рис. 4** Поле завихренности при  $Re = 1500$ , полученное по расчетам с использованием SST модели турбулентности

Частота срыва вихрей обуславливается расположением точки отрыва, которая смещается от задней критической точки вверх по поверхности цилиндра с ростом скорости набегающего потока. Течение в следе и окрестности цилиндра является ламинарным при  $Re < 150$ , а прослеживание вихревой дорожки вниз по потоку возможно на расстоянии до  $80d$ . В вихревом следе за цилиндром совершается ламинарно-турбулентный переход начиная с числа Рейнольдса близким к 150. Также область следа, в которой происходит переход с ростом  $Re$ , перемещается вверх по потоку. Начало срыва вихрей с поверхности цилиндра при  $150 < Re < 300$  происходит хаотично и установить преобладающую частоту не является возможным. Срыв вихрей становится постоянным при  $Re > 300$  и на основную частоту накладываются турбулентные возмущения. В результате данного процесса длина вихревой дорожки уменьшается вплоть до нескольких диаметров  $d$  цилиндра. Стоит отметить, что при этом число Струхала хорошо согласуется с эмпирической экспериментальной зависимостью, а также остается практически неизменным и равняется  $Sh \sim 0.21$  (рис. 5).

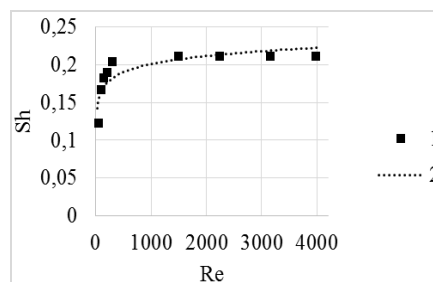


Рис. 5 Зависимость числа Струхала от числа Рейнольдса по эмпирической зависимости (1), на основе данных численного моделирования (2)

Заключение. Установлено, что ламинарно-турбулентный переход происходит в пограничном слое на поверхности цилиндра при числе  $Re$  равным  $2 \cdot 10^5$ . В результате данного процесса точка отрыва пограничного слоя смещается к задней критической точке на цилиндре. Результаты расчета сопоставлены с данными экспериментов [3]. Для всех задач было получено хорошее соответствие с экспериментальными данными, что позволяет говорить о возможности применения методики расчета для исследования несжимаемых течений в окрестности плохообтекаемых тел.

#### Литература

1. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering application // AIAA J. 1994. Vol. 32, No. 8. P. 1598–1605.
2. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme V // J. of Comput. Phys. 1983. Vol. 32, No. 1. P. 101–136.
3. Вальгер С.А., Федорова Н.Н. Моделирование ветровых воздействий на конструкции в ПК Ansys // Новосибирский государственный архитектурно-строительный уни-верситет (Сибстрин) – С. 73–77. 24
4. Ван-Дайк М.. Альбом течений жидкости и газа, Москва, Мир 1986. – С. 184.

## АБСОРБЦИОННАЯ ОСУШКА ПРИРОДНОГО ГАЗА И ПРИНЦИП РАСЧЕТА АБСОРБЕРА

А.А. Вакуров, А.П. Куренков

Научный руководитель – профессор С.Н. Харламов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

**Цель работы.** Исследование закономерностей и особенностей процесса абсорбции при изменении температуры ( $T = 15$  и давления ( $P = 1$  · осушаемого природного газа, а также выдача рекомендаций в практику прикладных исследований абсорбционной сушки в данных условиях.

**Введение.** Известно [1], что добываемый из недр земли природный газ содержит в себе водяные пары, которые в системе магистрального транспорта при изменении термобарических параметров приводят к образованию свободной воды, льда или гидратов. Поэтому перед магистральным транспортом добываемый природный газ необходимо подготовить так, чтобы удалить из его состава влагу. Наиболее распространенным способом осушки природного газа, является процесс абсорбционной осушки гликолями. Абсорбционный метод осушки природного газа основан на разности парциальных давлений водяных паров в газе и осушителе. В абсорбере при контакте жидкого осушителя с влажным газом процесс извлечения влаги из газа проходит до тех пор, пока величины парциального давления воды и над раствором осушителя не примут равные значения [1].

**Актуальность.** Проведенный библиографический анализ проблемы позволяет выделить ряд задач, требующих повышенного внимания в исследованиях теплообмена в аппаратах нефтегазовой отрасли: увеличение капельного уноса абсорбента с осушенным природным газом в систему магистрального транспорта; усиление коррозии оборудования; повышение потерь абсорбента в результате испарения. Перечисленные проблемы обусловлены снижением эффективности массообмена молекул воды из добываемого газа в фазу гликоля на тарелках абсорбера. В связи с этим **актуальным** является проведение различных исследований, которые будут направлены на разработку альтернативных способов повышения эффективности осушки добываемого пластового газа.

Практика показывает, что физическая сущность метода абсорбционной осушки газа состоит в абсорбции паров влаги с помощью абсорбентов-осушителей, которые выступают в роли поглотителей водяного пара. В качестве абсорбентов-осушителей принято использовать концентрированные водные растворы: моно-, ди-, а также триэтиленгликолей. Следует отметить, что описание используемых установок для абсорбционной осушки природного газа гликолями подробно рассмотрено и представлено, например, в [1, 2]. При этом установка для осушки природного газа состоит, как правило, из двух блоков: