

Определим приращение стрелки прогиба изогнутого участка и продольные напряжения в стенке трубы от нормативной продольной силы, расчетные продольные напряжения, коэффициент разгрузки. Критическая продольная сила определяется по формуле:

$$L_{кр}^2 = \frac{265EI}{q_{\theta} \rho_0 \left( 1 + \frac{80EIc_p}{q_{\theta}^2 \rho_0^2} \right)} \quad (11)$$

Вывод: в ходе данного исследования были получены расчеты для общей устойчивости нелинейного участка трубопровода. Расчетная длина волны выпучиванию равна:  $L_{кр}^2 = 446,25 \text{ м}^2$ .

При сравнения усилий определенных вычислений для устойчивости рассчитан  $N_{кр}=24,78 \text{ МН}$ , и проведена проверка условия устойчивости  $3,89 < 22,3 \text{ МН}$ . Это условие обеспечивает устойчивость газопровода.

Таким образом, полученные результаты данного исследования, подтверждают безопасность газопровода в описанных условиях.

#### Литература

1. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов: учебник/Быков Л.И и др. Санкт-Петербург: Недра, 2006. – 820с.
2. Строительные нормы и правил СНИП 2.05.06-58\*. Магистральные трубопроводы/Мин. рег. раз. РФ. 2002.–89с.
3. Р. А. Алиев. Трубопроводный транспорт нефти и газа. М.: Недра, 1988.– 368 с.

### ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЕВ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ЭМУЛЬСИИ ВОДА-В-МАСЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СТОЯЧИХ ВОЛН

**В.А. Бокор**

Научный руководитель – профессор С.Н. Харламов

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

Эффективное отделение водной фазы от эмульсии вода-в-масле (W / O) очень важно для нефтегазовой и химической переработки. В последние десятилетия методы разделения эмульсий, основанные на использовании ультразвуковых полей, обратили на себя большое внимание, благодаря эффективности и простоте. Направленная миграция капель, подвергнутых ультразвуковым стоячим волнам, известна как акустофорез [3].

Исследования частиц в слое в основном направлено на: повышение эффективности разделения слоя частиц и исследование характеристик слоев частиц. Существует много зарубежных публикаций, в которых приведены данные исследований по повышению эффективности разделения различных дисперсионных систем. В настоящее время исследования по формированию слоя капель в основном фокусируются на влиянии интенсивности звука и геометрии акустической камеры. Тем не менее, отсутствует всесторонний анализ характеристик слоев капель.

В данной статье рассмотрены влияние акустических параметров, размера капель и физических свойств масла и воды на время формирования слоя и интервал между слоями. Эти результаты позволят обеспечить глубокое понимание фундаментального механизма разделения эмульсий W/O при ультразвуковых стоячих волнах.

В качестве непрерывной фазы использовалось силиконовое масло, а в качестве дисперсной фазы ультрачистая вода, физические свойства которых приведены в таблице 1. Масляно-водное межфазное натяжение меняли путем добавления поверхностно-активного вещества.

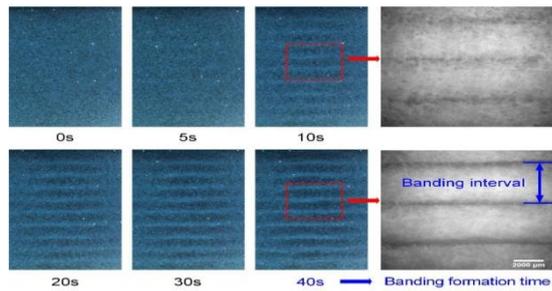
**Таблица 1**

**Физические свойства силиконового масла и ультрачистой воды (20 °C)**

	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Динамическая вязкость, $\mu$ , мПа*с	Поверхностное натяжение, $\gamma$ , мН/м	Скорость звука, с м/с
Силиконовое масло	0,958	106	31,5	967
Ультрачистая вода	0,995	1	72,46	1462

Процесс формирования слоя капель под воздействием ультразвуковых стоячих волн показан на рисунке 1. Перед применением (рис.5 (0s)) капли воды распределены однородно в масляной фазе. При наведении акустического поля, согласно уравнениям [2], капли воды начинают мигрировать в соседний узел давления с определенной скоростью.

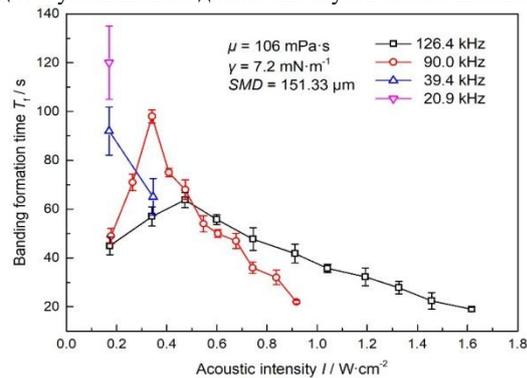
**СЕКЦИЯ 17. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ  
И ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА. ПОДСЕКЦИЯ 1. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ  
УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ**



**Рис. 1** Процесс формирования слоя капль под ультразвуковыми стоящими волнами ( $f=126.4$  кГц;  $I = 0.9$  Вт·см<sup>-2</sup>;  $\mu=106$  мПа·с;  $\gamma=7.2$  мН·м<sup>-1</sup>;  $SMD=151.33$  мкм) (сведения по [2])

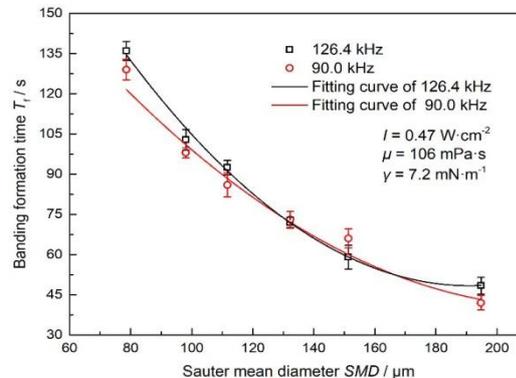
Полученные изображения были обработаны с помощью встроенных методов MATLAB и получены их характеристические параметры. Затем, был построен график, в качестве оси X был взят номер строки матрицы, в качестве оси Y – сумма элементов каждой строки. Был рассчитан интервал между слоями Db, который определяется как расстояние между двумя соседними слоями. Теоретически, интервал слоев должен равняться половине длины волны, которая является функцией частоты. Полученные результаты экспериментальных измерений интервала слоя оказались больше теоретических

На рисунке 2 показано время формирования полосы при различных акустических интенсивностях. Можно обнаружить, что диапазон интенсивностей акустических волн, в пределах которых может образовываться полоса, увеличивается с увеличением частоты. Чрезмерная амплитуда акустической волны вызывает появление акустической кавитации, что приводит к уменьшению диапазона акустической интенсивности.



**Рис. 2** Время формирования слоя при различных акустических интенсивностях (сведения по [2]).

Размер капль оказывает большое влияние на миграцию капль во время переходной фазы, поскольку первичная сила излучения и равнодействующая сила остаются неуравновешенными [1]. Время формирования слоя капль воды при различных SMD (средний диаметр Саутера) показано на рисунке 3. Факт, что скорость миграции капль пропорциональна квадрату радиуса капль, приводит к сокращению переходной фазы с увеличением размера капль. Поэтому время формирования полосы уменьшается с увеличением SMD капль воды.



**Рис. 3** Время формирования слоя капль воды в эмульсии W/O при различных SMD (сведения по [2]).

Время формирования слоя быстро увеличивается с увеличением вязкости масла на разных частотах. Согласно уравнению Адамара-Рыбчински [4] сила сопротивления, действующая на капль, увеличивается с увеличением вязкости масла.

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

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:

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

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