

## Распределение физических параметров высококонтрированной эмульсии при установившемся течении в канале переменного сечения

Воробьёв Н.А., Валиев А.А., Ахметов А.Т., Урманчеев С.Ф.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

В экспериментальных исследованиях течения высококонтрированной эмульсий было обнаружено, что с течением времени их объёмный расход резко уменьшается. Поскольку, как правило, расход не становится равным нулю, это явление получило название «эффект динамического запираания». Следует отметить, что эффект проявляется не только в технических эмульсиях, но и в эмульсиях из простых химических соединений. Было выявлено, что в области сужения канала происходит скопление частиц дисперсной фазы. В работе обсуждаются вопросы, связанные с деформацией капель при динамическом запираании обратных эмульсий. Полученные зависимости позволяют описать механизм возникновения динамического запираания при течении эмульсий в канале со ступенчатым сужением.

**Ключевые слова:** эмульсия, канал переменного сечения, динамическое запираание

### 1. Введение

Эмульсии представляют собой дисперсные системы, состоящие из двух несмешивающихся жидкостей, одна из которых диспергирована в другой в виде капель. Эмульсии получили самое широкое распространение в разнообразных отраслях промышленности: нефтеперерабатывающей, пищевой, текстильной и т.д. Примеры эмульсий, встречающихся в повседневной жизни, — майонез, молоко, сметана, косметические эмульсии, водоэмульсионные краски. Некоторые технологические процессы включают в себя стадию эмульгирования. Постоянный интерес к многостороннему исследованию эмульсий обуславливается их практической значимостью. Эмульсии, в отличие от суспензий, могут существовать при концентрации капель, превышающей объёмную концентрацию при наиболее плотной упаковке в суспензиях. Функциональная часть эмульсии, которая определяет её потребительские

качества, может быть сосредоточена как в диспергированных каплях, так и в дисперсионной среде, играющей роль носителя или связующего. Эмульсии подразделяются на прямые и обратные. По определению прямая эмульсия — это капли неполярной жидкости в полярной среде и, соответственно, наоборот — для обратной эмульсии. В приведенных ниже экспериментальных исследованиях использовалась обратная эмульсия. При исследовании течения эмульсий в микроканалах различной геометрии обнаружен эффект, названный «динамическим запираанием» [1, 2]. Эффект заключается в том, что расход эмульсии через микроканал со временем снижается на два и более порядка, несмотря на наличие постоянного градиента давления. Теоретическому анализу движения эмульсий в переходной зоне перед входом в капилляр с разработкой математической модели и схематическим изображением арочных структур посвящена работа [3], в которой было предложено провести численные решения для построения линий тока. Настоящая работа посвящена детальному рассмотрению влияния деформации капель на замедление течения эмульсии.

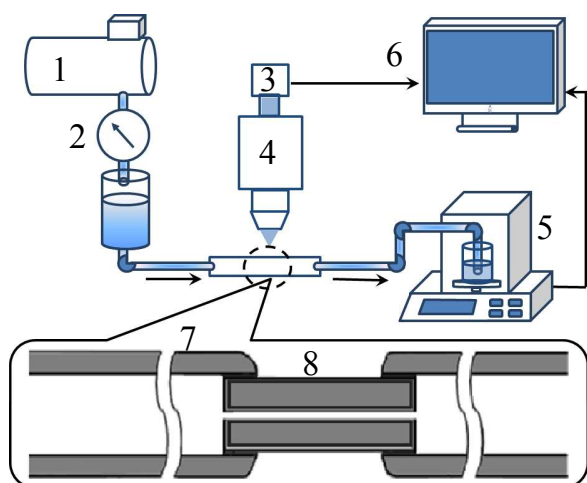


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки с цилиндрическим микроканалом с внезапным сужением: 1) воздушный компрессор, 2) манометр, 3) видеокамера, 4) микроскоп, 5) прецизионные весы, 6) компьютер, 7) подводящие трубки, 8) цилиндрический стеклянный микроканал

## 2. Экспериментальные исследования

Для проведения эксперимента использовалась установка, схема которой приведена на рис. 1. В качестве гидравлической системы использовался цилиндрический стеклянный микроканал с внутренним диаметром 100 мкм и длиной 2 см.

Для экспериментов была приготовлена обратная эмульсия на основе простых химических соединений: дистиллированная вода — 74% и углеводородная фаза: декан — 22% с эмульгатором Span80 — 4% (рис. 2).

В экспериментальных исследованиях [4, 5] было обнаружено, что эффект проявляется и при течении эмульсий из простых химических соединений. При перепаде давления 200 кПа начальная скорость составляла 50 см/с, через 15 минут начался процесс «запирания». На 20-ой минуте скорость упала в 100 раз. Через час чувствительности весов стало недостаточно для регистрации расхода, скорость упала в 1000 раз и измерялась по анализу видеоизображения. Далее скорость продолжала уменьшаться при неизменном перепаде давления (рис. 3).

Физический механизм динамического запирания обратных водоуглеводородных эмульсий в микроканалах связан с образованием структуры из микрокапель воды у входа в микроканал. Поверхность микрокапель воды состоит из молекул ПАВ

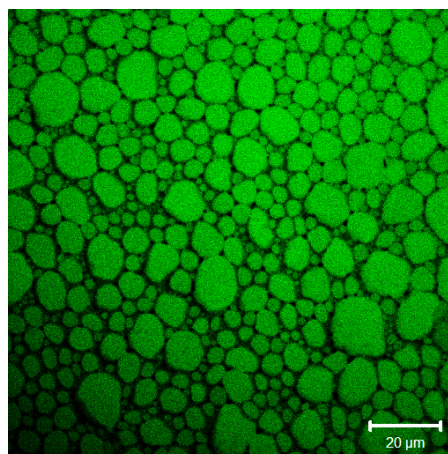


Рис. 2. Микрофотография эмульсии

эмульгатора, размер которых около 3 нм. Если рассмотреть течение эмульсии у входа в микроканал (рис. 4(а,б)), на который приходится весь перепад давления на начальном этапе, то с течением времени происходит некоторая сепарация микрокапель воды. У входа в микроканал концентрация капель воды возрастает, что приводит к увеличению вязкости во входной зоне и потери части перепада давления в зоне входа в капилляр. Это приводит к увеличению градиента давления во входной зоне, дальнейшей сепарации капель воды и их частичной деформации. Постепенно несущая фаза выжимается из пространства между микрокаплями в местах их сближения; проявляется сила трения, происходит структурирование эмульсии во входной зоне и преобразование капель воды из сферической формы в многогранные фигуры (рис. 4(в)), а точки касания между каплями образуют поверхности.

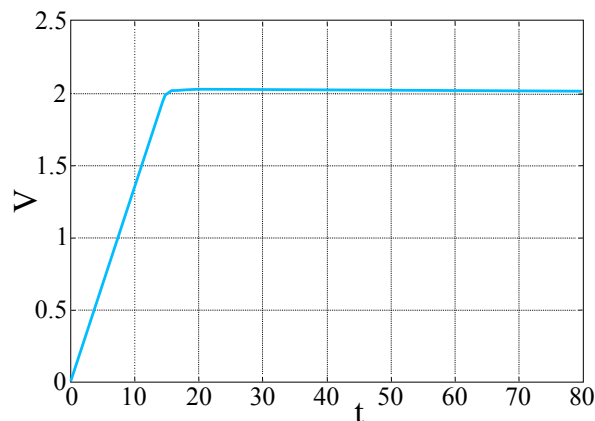


Рис. 3. Зависимость объема и скорости течения эмульсии от времени, полученная весовым методом

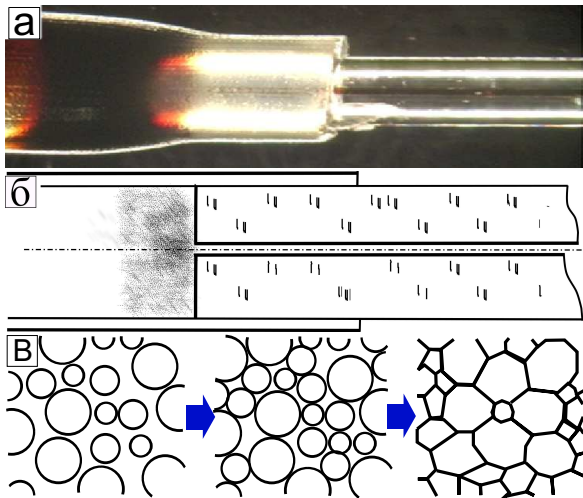


Рис. 4. Эмульсия в микроканале со ступенчатым сужением: а) фотография микроканала с подводящей трубкой, б) схема микроканала с сужением, в) схематичное представление преобразования микрокапель эмульсии перед входом в сужение

Таким образом, можно предположить, что под действием достаточно большого градиента давления углеводородная фаза выжимается из пространства между микрокаплями воды. В результате движение эмульсии практически останавливается.

### 3. Теоретические оценки

При математическом описании влияния деформации капли на движение эмульсии предполагается, что в канале имеет место ламинарное течение с профилем Пуазейля [6]:

$$v(r) = \frac{\Delta P}{4\eta L} (R^2 - r^2),$$

где  $\eta = \eta_0(1 + 2.5c)$  — вязкость эмульсии;  $\eta_0$  — динамическая вязкость дисперсионной фазы;  $c$  — концентрация капель;  $v$  — скорость жидкости вдоль канала;  $\Delta P$  — перепад давления;  $L$  — длина;  $R$  — радиус канала.

В области внезапного сужения происходит скопление частиц дисперсной фазы, вследствие чего, в соответствии с результатом работы [7], считаем, что происходит динамическое запираение. При этом, в результате локального уменьшения проницаемости и соответствующего увеличения сопротивления, происходит деформация частиц дисперсной фазы в зоне их скопления. Течение дисперсионной фазы в указанной зоне можно описать законом Дарси [8]:

$$u = -\frac{k}{\eta_0} \text{grad } P,$$

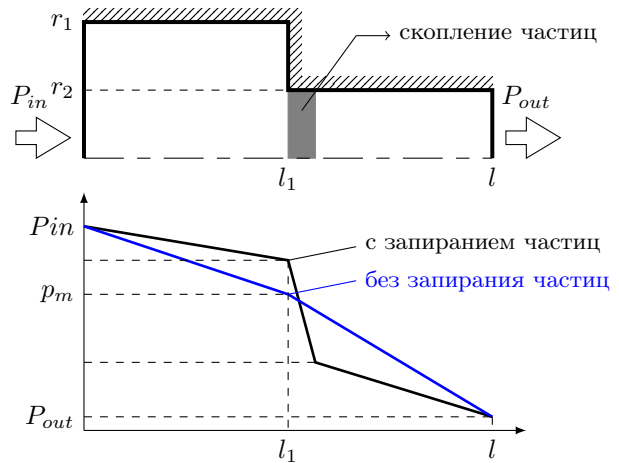


Рис. 5. Схема канала со ступенчатым сужением

где  $u$  — скорость фильтрации;  $k$  — проницаемость области скопления частиц. Зависимость проницаемости от пористости примем заданной формулой:  $k = \frac{R_m^2 m}{8}$ , где  $R_m$  — характерный радиус пор [9]. На рис. 5 представлена схема канала со ступенчатым сужением длиной  $l$  и радиусами  $r_1$  и  $r_2$ .

В соответствии с выдвинутым ранее предположением причина, по которой деформация капель приводит к резкому снижению расхода эмульсии, связана с увеличением площадки контакта между каплями, что, в свою очередь, ведет к увеличению эффективной вязкости дисперсной системы. Далее, для определения влияния деформации капель дисперсной фазы на процесс динамического запираения потока была рассмотрена задача об их сжатии двумя плоскостями. На рис. 6 представлена капля радиусом  $R$  до сжатия и после сжатия одной из плоскостей на величину  $d$  под действием сжимающей силы  $F$ .

Объем сдавленной частицы вычисляется как тело вращения по формуле:

$$V' = 2\pi \int_0^r \left(\frac{h}{2} + y(x)\right)^2 dx = \frac{\pi r h^2}{2} + \frac{4\pi r^3}{3} + \frac{\pi^2 h r^2}{2},$$

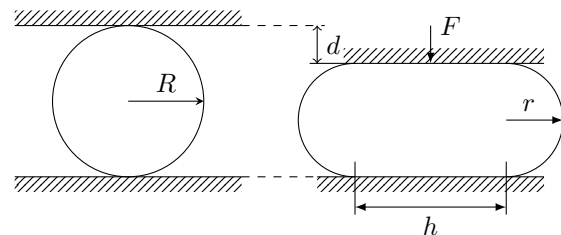


Рис. 6. Схематичное изображение частицы. Слева — до деформации, справа — после деформации

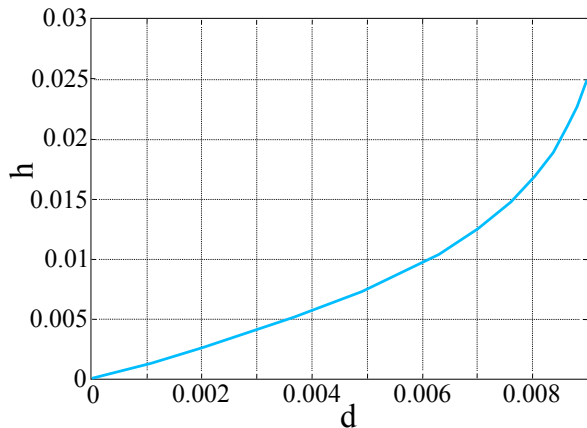


Рис. 7. Изменение диаметра окружности контакта частицы со сжимающей плоскостью от величины смещения

где  $y(x) = \sqrt{r^2 - x^2}$ . На основе предположения, что объем частицы не изменяется при сдавливании ( $V = \frac{4}{3}\pi R^3 = V'$ ), для диаметра окружности контакта капли с плоскостями в зависимости от величины смещения сдавливающей плоскости  $h = h(d)$ , после ряда выкладок, получено следующее выражение:

$$h = \frac{\sqrt{\frac{\pi^2 r^4}{4} + \frac{8}{3}r(R^3 - r^3)} - \frac{\pi r^2}{2}}{r},$$

где  $r = r(d) = R - \frac{d}{2}$ .

На рис. 7 представлен график зависимости изменения диаметра окружности контакта  $h$  от величины смещения  $d$ .

Также получено соотношения для пористости  $m = m(d)$  от величины смещения:

$$m = 1 - \frac{2\pi r \left(r + \frac{h}{2}\right)^2}{\frac{\pi r h^2}{2} + \frac{4\pi r^3}{3} + \frac{\pi^2 h r^2}{2}},$$

на рис. 8 приведена соответствующая зависимость.

Исходя из уравнения Лапласа

$$P_{lap} = \sigma \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{\frac{h}{2} + r} \right),$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение;  $r$  и  $\frac{h}{2} + r$  — радиусы кривизны, получена зависимость изменения давления в капле  $\Delta P = \Delta P(d)$  от величины смеще-

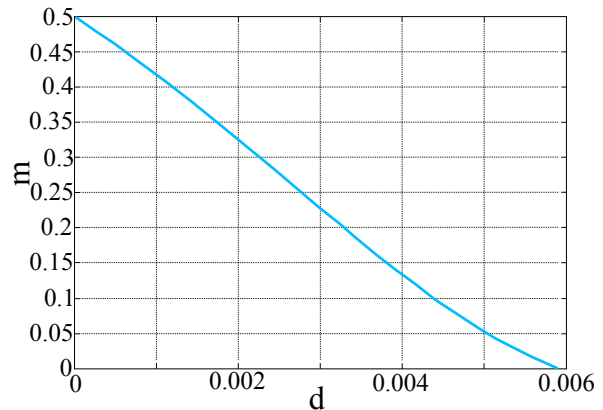


Рис. 8. Изменение пористости в зависимости от величины смещения

ния, обусловленного приложенной нагрузкой:

$$\Delta P = \sigma \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{\frac{h}{2} + r} - \frac{2}{R} \right).$$

График указанной зависимости приведен на рис. 9.

#### 4. Заключение

Полученные формулы позволяют найти зависимость проницаемости дисперсной системы от градиента давления и описать механизм возникновения динамического запирания при течении эмульсий в канале со ступенчатым сужением. Полученные зависимости объема протекающей эмульсии через микроканал от времени иллюстрируют эффект динамического запирания.

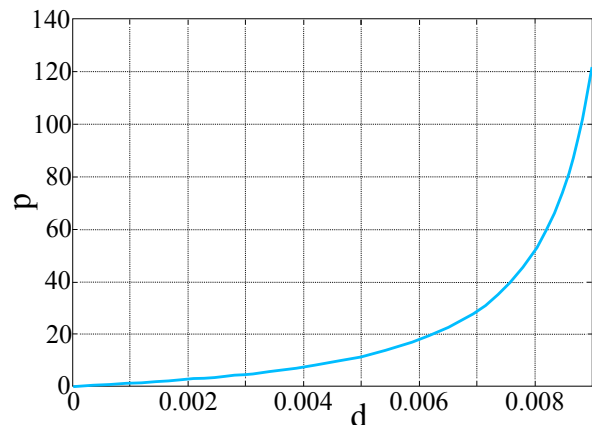


Рис. 9. Изменение давления в капле в зависимости от величины смещения

## Список литературы

- [1] Akhmetov A., Telin A., Glukhov V., Mavletov M. Flow of Emulsion through Slot and Pore Structures. *Advances in Incremental Petroleum Production // Progress in Mining and Oil-field Chemistry*. Budapest: Akademiai Kiado. 2003. Vol. 5. P. 287–295.
- [2] Ахметов А., Телин А., Глухов В., Силян М. Физическое моделирование и методы визуализации при разработке основ нетрадиционных технологий на базе инвертных дисперсий // *Технологии ТЭК*. Москва: Нефть и капитал. 2004. № 1(14). С 33–36.
- [3] Хабиров С.В., Ахметов А.Т. Движение эмульсии в переходной зоне трубка–капилляр // *Труды Института механики Уфимского научного центра РАН*. Вып. 8. Уфа: Нефтегазовое дело. 2011. С. 133–142.
- [4] Ахметов А.Т., Валиев А.А. Особенности течения в микроканалах обратных эмульсий приготовленных из простых химических соединений // *Тезисы докладов Все-российской с международным участием научно-практической конференции «Практические аспекты нефтепромышленной химии»*. Уфа. 2011. С. 69–70.
- [5] Валиев А.А. Преобразование эмульсии при течении через цилиндрический микроканал // *Волны и вихри в сложных средах: Всероссийская научная школа молодых ученых; 3–5 декабря 2012*. Москва: Тезисы докладов. М.: МАКС Пресс. 2012. С. 41–46.
- [6] Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
- [7] Ахметов А.Т., Саметов С.П. Особенности течения дисперсии из микрокапель воды в микроканалах // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36, вып. 22. С. 21–28.
- [8] Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. *Подземная гидромеханика* // М.: Недра, 1993. 416 с.
- [9] Гиматулинов Ш.К. *Физика нефтяного и газового пласта* // М.: Недра, 1971. 310 с.

## Steady flow a highly concentrated emulsion in a cylindrical channel with stepped constriction

Vorobyev N.A., Valiev A.A., Akhmetov A.T., Urmancheev S.F.

Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa

In experimental studies it was found that the effect appear during flow not only in technical emulsions, but also emulsions from simple chemical compounds. It was also suggested that in the region of narrowing of the channel, there is accumulation of particles in the dispersed phase, as a result occurs dynamic blocking. A mathematical model of the flow of a highly concentrated emulsion in a channel with a stepped constriction is constructed.

**Keywords:** emulsion, hydrodynamic, dynamic blocking effect

