

УДК 532.5; 532.135; 612.13

ТЕЧЕНИЕ ДИСПЕРСИЙ, ВКЛЮЧАЯ БИОЛОГИЧЕСКИЕ, В МИКРОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ

А.Т. Ахметов, А.А. Рахимов, А.А. Валиев, Р.Р. Нигматзянова

Аннотация

Экспериментальное исследование течения инвертных эмульсий в микроканалах обнаружило трансформацию эмульсий и проявление новых гидродинамических свойств, обусловленных масштабным фактором, взаимодействием наномасштабных оболочек и большими градиентами давления. Полученные зависимости объема, протекающей эмульсии через микроканал, от времени, иллюстрируют эффект динамического запираания, который состоит в том, что течение эмульсии через участок микроканала со временем прекращается, несмотря на постоянно действующий перепад давления. Приводится физический механизм эффекта динамического запираания. Получены результаты по течению биологической дисперсии - крови в микроканале, показано влияние ориентации канала в гравитационном поле на проявление эффекта динамического запираания. Перечислены гидродинамические особенности инвертных эмульсий и биологической дисперсии в микрожидкостных системах. Проявление эффекта динамического запираания крови может рассматриваться как одна из причин возникновения инсульта и инфаркта в кровеносной системе живых организмов со стенозами.

Ключевые слова: течение в микроканалах, перепад давления, эффект динамического запираания, реологические свойства, эмульсия, кровь, эритроцит

1. Введение

Основной гидродинамической особенностью эмульсий и биологической дисперсии - крови является их высокая вязкость, по сравнению с вязкостью несущей фазы. При этом реология эмульсий зависит от состава дисперсной и дисперсионной фаз, от эмульгатора, концентрации всех компонент и способа приготовления эмульсий. В случае крови её вязкость в основном определяется гематокритом (концентрация эритроцитов и других форменных элементов, составляющих дисперсную фазу). При течении дисперсий в микроканалах проявляются новые гидродинамические свойства, обусловленные масштабным фактором и самоорганизацией дисперсной фазы. Исследование течения эмульсий в микроканалах различной геометрии обнаружило совершенно неожиданный эффект динамического запираания, который состоит в том, что течение эмульсии через участок микроканала со временем прекращается, несмотря на постоянно действующий перепад давления. Такое название эффект получил ввиду того, что при визуальной наблюдаемой остановке течения в масштабе модели, в микромасштабе обнаруживаются микропотоки с гораздо меньшим расходом, расход течения снижается на 3 - 4 порядка [1], [2]. Физическая природа эффекта связана с проявлением трения между наномасштабными оболочками из ПАВ в точках касания микрокапель воды, их деформацией и последовательной структуризацией за счет перераспределения поля давлений у входа в микроканал [3]. Эта гипотетическая идея была косвенно подтверждена в работе [4], показывающей рост взаимодействия капель эмульсии при вымещении

несущей фазы из пространства между каплями, то есть сближение капель до молекулярного взаимодействия молекул поверхностно-активного вещества, которые являются компонентами оболочек капель.

Кровь – биологическая дисперсия, дисперсная фаза которой в основном состоит из эластичных эритроцитов основной составляющей их оболочек является двойной липидный слой, аналог молекул ПАВ в оболочке микрокапель воды в эмульсии. При течении крови в микроканалах [5] в определенных условиях проявляется эффект динамического запираания.

Детальные исследования течений эмульсий в различных типах микроканалов: ячейка Хили-Шоу (поступательное и радиальное течения), одиночный капилляр (осесимметричное течение), микромодель [6] (прозрачная сложная система микроканалов, полученная фотолитографическим методом), нефтеносные керны - обнаружили эффект динамического запираания.

2. Особенности течения эмульсии в микроканале

У используемых дисперсий изучались реологические свойства на прецизионном реометре HAAKE MARS III. Многочисленные измерения зависимости напряжения сдвига от скорости деформации сдвига эмульсий в диапазоне $10 \div 1000 \text{ с}^{-1}$ показали, что реологические кривые с высокой степенью достоверности аппроксимируются степенной функцией, т. е. описываются моделью жидкости Оствальда – де Ваале. Реологические кривые крови с высокой степенью достоверности аппроксимировались степенной функцией и хорошо удовлетворяют как модели Оствальда – де Ваале. Экспериментальные измерения расходных характеристик при осесимметричном течении в микроканале удовлетворительно описываются модернизированной формулой Пуазейля для жидкости Оствальда – де Ваале с параметрами полученными из результатов реологических измерений.

Эффект динамического запираания первоначально был обнаружен при течении обратной водонефтяной эмульсии с составом: нефть – 22 %, Нефтенол-НЗ – 4 %, минерализованная вода – 74 %. Оказалось, что при течении эмульсия в/м на основе простых химических соединений: дистиллированная вода – 74 % и углеводородная фаза: декан – 22 % с эмульгатором Span 80 – 4 % также обнаруживается динамическое запираание.

Наиболее наглядно трансформация эмульсии при течении в микроканале проявлялась в ячейке Хили-Шоу, но более удобным и простым способом сравнения гидродинамических особенностей течения эмульсий в микроканалах оказалось осесимметричное течение. Использовался цилиндрический стеклянный микроканал внутренним диаметром 100 мкм и длиной 2 см и подводившие термоосаживающиеся трубки диаметром 1,5 мм. Давление подавалось с помощью компрессора, количество протекающей эмульсии фиксировалось прецизионными электронными весами, сопряженными с компьютером. В состоянии "запираания" измерения проводились по анализу видеоизображений.

Гипотетическое представление о механизме динамического запираания следующее. У входа в микроканал увеличивается концентрация эмульсии, капли сближаются, проявляется "трение перепад давления практически весь приходится на входную зону капилляра, капли деформируются, скорость существенно снижается. Исходя из сказанного можно предположить, что если в состоянии "запираания" перепад давления снизить, то степень деформации капель должна уменьшиться, взаимодействие между ними ослабнет и скорость течения вырастет.

Для проверки гипотезы, о роли деформации капель в состоянии динамического запираания, в эксперименте с цилиндрическим капилляром после выхода в состо-

яние "запирания" перепад давления ступенчато уменьшали с 200 (рис. 1, кадр 1) до 50 кПа (кадры 2-4). При уменьшении перепада до 150 скорость практически не изменилась, дальнейшее снижение давления до 100 кПа привело к увеличению скорости в 1,5 раза (кадр 2). Дальнейшее снижение давления в 4 раза привело к увеличению скорости почти в 2,5 раза (кадр 3), через 1,5 минуты она увеличилась практически в 4 раза (кадр 4). Для исключения влияния деформации капель был проведен кратковременный (1 минута) сброс давления до 2 кПа, небольшой перепад давления был оставлен, чтобы не разрушить структуру у входа в микроканал.

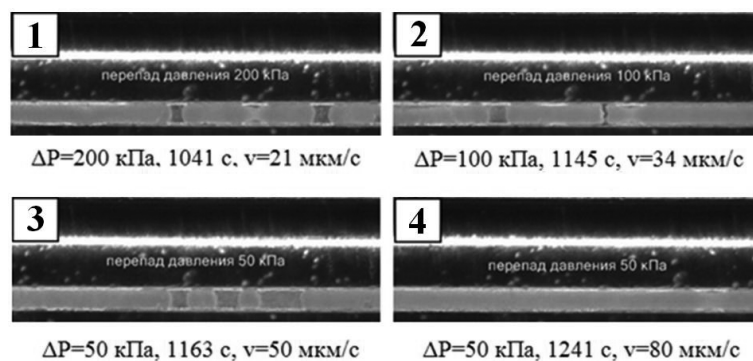


Рис. 1. Кадры микросъемок структуры в микроканале при изменении перепада давления. Под кадрами время от начала движения и скорость течения, найденная из видеозаписи

Через минуту перепад давления восстановили до 200 кПа. Скорость течения эмульсии через микроканал возросла на два порядка относительно скорости до сброса давления (рис. 2). Для уточнения фазового состава в структуре потока перед приготовлением эмульсии в водную фазу был добавлен краситель, флуоресцирующий в зеленой области при освещении ультрафиолетовым светом.

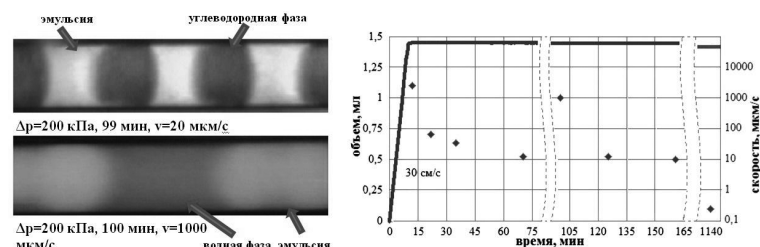


Рис. 2. Структура потока и скорости до и после кратковременного сброса давления. График зависимости объема прошедшей через микроканал эмульсии и скорости течения эмульсии в "состоянии запирания" (справа) в микроканале от времени

Структура течения существенно изменилась, если до сброса давления чередовались углеводородная фаза и эмульсия, то после восстановления давления чередуются эмульсия и водная фаза. Углеводородная фаза в чистом виде исчезла, изменились на противоположные углы смачивания. По всей видимости, часть микрокапель воды структурировавшихся во входной зоне при восстановлении давления коалесцируют и образуют сплошную водную фазу. Как видно на графике (рис. 2) система достаточно быстро снова выходит в состояние динамического запирания. Полученные результаты косвенно подтверждают связь механизма "запирания" с деформацией микрокапель.

Динамическое запираание эмульсии было обнаружено при ступенчатом уменьшении сечения каналов на порядок и более. При изучении течений эмульсий через каналы с плавным сужением от 600 до 40 мкм запираание проявляется с образованием характерной структуры при появлении небольшой частички или волокна, частично перекрывающих микроканал.

Использование методов мягкой фотолитографии, позволяет изготовить микрожидкостные устройства с микроканалами нужной геометрической формы. При этом рельефная структура изготавливается в PDMS, который хорошо прилипает к поверхности покровного стекла, через него изучается движение дисперсии. Что позволяет использовать высокоразрешающую оптическую микроскопию. Мы изготовили простейшую микрожидкостную систему прямоугольный канал шириной 1000 мкм, глубиной 50 мкм с перегородкой, имеющее прямоугольное отверстие 50X50 мкм (рис. 3).

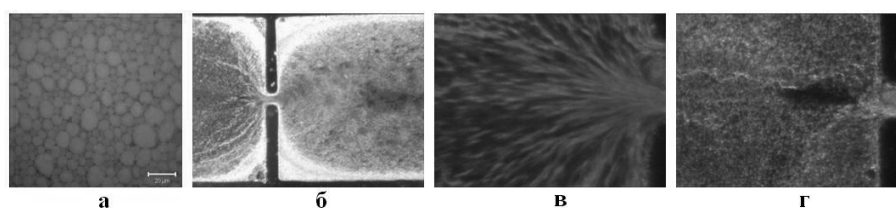


Рис. 3. Кадры видеоизображения течения эмульсии при перепаде давления 1 кПа, верхний при кольцевом освещении от галогеновой лампы на темном фоне, нижний - ртутной лампой сверху, сбоку на темном фоне, скорость течения 0,5

На приведенной фотографии движущейся эмульсии, протекающей через отверстие в перегородке слева направо, наблюдается некоторая асимметрия в картине течения (рис. 3, б). При большом увеличении движущиеся капли эмульсии смазаны (рис. 3, в) с течением времени течение существенно замедляется до 15 мкм/с в узкой части (рис. 3, г). Использование высокоскоростной съёмки и конфокальной микроскопии позволит детально разобраться в механизме эффекта динамического запираания.

3. Течение биологической дисперсии - крови через цилиндрический микроканал

Исследование течения крови через участок микроканала при постоянно действующем перепаде давления с вертикальной ориентацией при направлениях потока вертикально вверх и вертикально вниз показало существенное различие, обусловленное седиментацией эритроцитов. В капилляре диаметром 100 мкм и длиной 2 см находящемся в термоусаживающейся трубке проведен эксперимент по изучению запираания крови при перепаде давления 20 кПа.

Вычисленные скорости деформации сдвига при течении в микроканале соответствовали физиологическим значениям скоростей деформации сдвига и составляли на различных участках кривой расхода от 13 до 916 c^{-1} . При течении снизу вверх со временем наступает остановка течения, в следствие динамического запираания (рис. 4, 5450 с). В капилляре запечатанном в термоусаживающуюся трубку струйка эритроцитов исчезает, начинается седиментация эритроцитов, течение возобновляется и весь поток вместе с эритроцитами поднимается (рис. 4, 5790 – 5840с) и снова наступает запираание (рис. 4, 5860 с).

Струйка эритроцитов снова исчезает и начинается седиментация (рис. 4, 5880 – 6250 с). Далее течение возобновляется (рис. 4, 6265 – 6280 с). Таким образом,

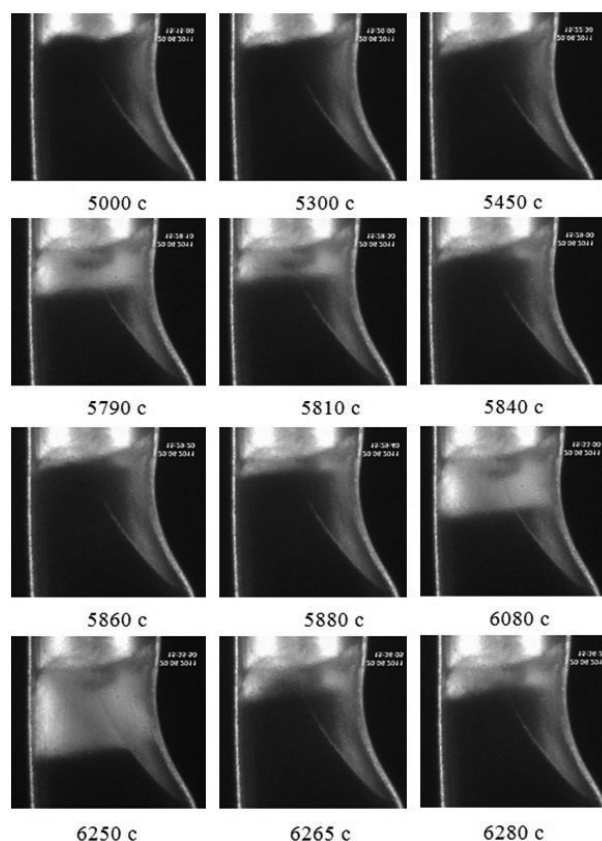


Рис. 4. Кадры, соответствующие закупорке и открытию движения

приведенный рисунок иллюстрирует подобие автоколебательного режима.

Следует отметить различие при течении через микроканал сверху-вниз и снизу-вверх. Если при течении крови вертикально вниз со временем наступает довольно устойчивое динамическое заклинивание, то при течении вверх после наступления заклинивания седиментационные процессы приводят к возобновлению течения, и далее обнаруживается подобие автоколебательного режима.

4. Заключение

Реологические кривые в виде степенной функции для эмульсии и биологической дисперсии - крови с высокой степенью достоверности аппроксимируют данные измерений в диапазоне $10 \div 1000 \text{ c}^{-1}$, т. е. описываются моделью жидкости Оствальда - де Ваала. Модернизированная формула Пуазейля для жидкости Оствальда - де Ваала с параметрами соответствующими экспериментальным измерениям удовлетворительно согласуется при осесимметричном течении в микроканале.

Течение эмульсии через микроканалы обнаруживает два типа неустойчивости. Первая - при постоянно действующем перепаде давления со временем наступает динамическое заклинивание скорость течения уменьшается на несколько порядков. Вторая - в состоянии "заклинивания" наблюдается неоднозначная зависимость от перепада давления, в частности, уменьшение давления вдвое приводит к удвоению скорости ползучего движения.

Эффект динамического заклинивания биологической дисперсии крови при тече-

нии через осесимметричный микроканал отличается от случая водоуглеводородных эмульсий тем, что запирание не столь устойчиво. Что, по всей видимости, связано с несферичностью геометрической формы эритроцитов и тем, что взаимодействие их наноразмерных оболочек несколько отлично от взаимодействия оболочек микрокапель воды, состоящих из молекул ПАВ. Если при течении крови вертикально вниз со временем наступает довольно устойчивое динамическое запирание, то при течении её вверх после наступления запирания седиментационные процессы приводят к возобновлению течения, и далее обнаруживается подобие автоколебательного режима.

Использование микрожидкостного устройства позволило увидеть поведение отдельных капель эмульсии в микроканале при ступенчатом изменении сечения канала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта РФФИ №14-01-97033 р _поволжье _ а.

Summary

A. T. Akhmetov, A. A. Rakhimov, A. A. Valiev, R. R. Nigmatzyanova. Dispersion flow including biological in microfluidic systems

Rheological curves as a power function for dispersion and biological emulsion - blood with a high degree validity approximate measurement data in the range $10 \div 1000 c^{-1}$, i.e. they are described by a model of Ostwald-de Waale fluid. Upgraded Poiseuille's Equation for Ostwald-de Waale fluid with parameters corresponding to the experimental measurements is in satisfactory agreement with the axisymmetric flow in a microchannel. Flow of emulsion through microchannels detects two types of instability. The first, at a constant pressure drop over time, comes the dynamic blocking, in which the flow velocity is reduced by several orders of magnitude. Second, in condition of "blocking" is observed ambiguous dependence of the pressure drop, in particular, the reduction of pressure twice leads to doubling of creeping motion velocity. The effect of dynamic blocking of biological dispersion (blood) in the flow through a microchannel is different from the axisymmetric case of water-hydrocarbon emulsions that blocking is not so stable. This is associated apparently with nonspherical geometric shape of erythrocytes (red blood cells) and that interaction of their nanoscale membranes is rather different from the interaction of water microdrops shells consisting of surfactant molecules. In the blood flow in the straight down direction with the lapse of time fairly stable dynamic blocking is comes, when flow is in straight up direction the sedimentation processes after the blocking condition leads to the resumption of the flow, and then the similarity of self-oscillatory regime is found. Using a microfluidic device allowed us to see the behavior of individual emulsion microdrops in a microchannel with a step change section of the channel.

Key words: flow in microchannels, pressure drop, the dynamic blocking phenomenon, rheological properties, emulsion, blood, red blood cell.

Литература

1. *Akhmetov A. T., Telin A. G., Glukhov V. V.* Dynamic Blocking at the Flow of Invert Water-Oil Emulsions.// XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM04). – Warsaw, Poland. – 2004. – P. 162.
2. *Ахметов А. Т., Саметов С. П.* Особенности течения дисперсии из микрокапель воды в микроканалах.// Письма в ЖТФ. – Том 36. – № 22. – 2010. – С. 21 – 28.
3. *Akhmetov A. T., Telin A. G., Mavletov M. V., Sametov S. P., Silin M. J.* Flow of Invert Water-Oil Dispersions in Capillaries.// International Conference. Fluxes and Structures in Fluids, Moscow, Institute for Problems in Mechanics of the RAS and Lomonosov Moscow State University. –2006. – P. 16 – 21.

4. *Denkov N.D., Tcholakova S., Golemanov K., Lips A.* Jamming in Sheared Foams and Emulsions Explained by Critical Instability of the Films between Neighboring Bubbles and Drops. // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – P. 103.
5. *Ахметов А.Т., Закиров К.Р., Саметов С.П.* Возможный механизм возникновения инфаркта. // *Труды Института механики УНЦ РАН.* // Под ред. С.Ф. Урманчеева, С.В. Хабирова. // Уфа: Гилем. – 2008. – № 1. – С. 229. – С. 13 – 18.
6. *Ахметов А.Т., Федоров К.М., Нигматуллин Р.И.* О механизме вытеснения нефти из пористой среды мицеллярными растворами. // *Докл. АН СССР.* – 1987. – Том 293. – № 3. – С. 558–563.

Сведения о каждом из авторов статьи

Ахметов Альфир Тимирзянович – к.ф.-м.н., с.н.с., зав. лабораторией "Экспериментальная гидродинамика" Институт механики УНЦ РАН, Уфа

E-mail: alfir@anrb.ru

Рахимов Артур Ашотович – к.ф.-м.н., м.н.с., лаборатория "Экспериментальная гидродинамика" Институт механики УНЦ РАН, Уфа

E-mail: ragar83@mail.ru

Валиев Азат Ахматович – аспирант, лаборатория "Экспериментальная гидродинамика" Институт механики УНЦ РАН, Уфа

E-mail: azatphysic@mail.ru

Нигматзянова Роза Рашитовна – ординатор ГБОУ ВПО БГМУ Минздрава России, Уфа

E-mail: rosrush88@mail.ru