УДК: 532.58

**МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭФФЕКТА ДИНАМИЧЕСКОГО ЗАПИРАНИЯ
В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ****© Р. З. Шайхитдинов^{1*}, Д. Т. Гатиятуллин¹, И. А. Мустафин²**¹*Бакирский государственный университет**Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.**Тел.: +7 (347) 229 97 19.***Email: plasma@bsunet.ru*²*Уфимский государственный нефтяной технический университет**Россия, Республика Башкортостан, 450062 г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.**Тел. +7 (347) 242 03 70.**Email: iamustafin@gmail.com*

Предлагается механизм возникновения эффекта динамического запирания, экспериментально наблюдаемого в обратных водоуглеводородных эмульсиях и суспензиях. Суть этого механизма заключается в том, что дисперсионная среда, протекая в сужающемся пространстве между жидкими или твердыми частицами дисперсной фазы, ускоряется, вследствие чего в этой области сужения, согласно уравнению Бернулли, давление падает. Это приводит к возникновению разности давлений в пространстве между частицами дисперсной фазы и внешними их сторонами и соответственно – к образованию упорядоченной структуры из этих частиц, что является причиной запирания входа капилляров.

Ключевые слова: эффект динамического запирания, гидродинамика, дисперсные системы, эмульсии, суспензии.

Эффект динамического запирания, экспериментально установленный в работах [1], наблюдается при течении концентрированных обратных водоуглеводородных эмульсий, представляющих собой диспергированные в углеводороде микрокапли воды, суть которого состоит в уменьшении (вплоть до полного прекращения) течения эмульсий в капиллярных структурах и микроканалах различной конфигурации при постоянно действующем внешнем давлении.

В условиях проведенных в [1] экспериментов максимальный диаметр цилиндрического капилляра, при котором наблюдалось запирание, равнялся 250 мкм; зазор между двумя оптическими стеклами плоского микроканала – ячейки Хили-Шоу – размерами 4×2 см равнялся 17 мкм, в то время как диаметр диспергированных капель воды составлял 0.3–2.0 мкм. На основе опытов с механическим воздействием на входную зону капилляра авторами установлено, что главной причиной запирания эмульсий является образование у входа в капилляр структуры из микрокапель воды протяженностью не более 500 мкм. По мнению авторов, образование такой структуры обусловлено действием силы трения между микрокаплями воды, на поверхности которых находятся перпендикулярно расположенные молекулы поверхностно-активных веществ длиной ~3 нм.

Следующим этапом исследований механизма динамического запирания явилось изучение особенностей течений эмульсий и суспензий с тождественным составом, полученных путем замораживания дисперсной фазы, через цилиндрический микроканал [2]. В результате экспериментов установлено, что при одних и тех же условиях степень

запирания эмульсии более чем на порядок выше по сравнению с суспензией. Это обстоятельство авторы объясняют более плотной упаковкой микрокапель воды вследствие их деформации при значительных градиентах давления. Исследования эффекта динамического запирания продолжаются (например, [3]), ранее полученные результаты из которых обобщены в [4–5].

Аналогичный эффект запирания, экспериментально наблюдаемый в суспензиях [6], объяснялся образованием арочных структур из твердых частиц дисперсной фазы у входа в капиллярные каналы вследствие сухого трения между частицами. При таких же условиях экспериментов авторами работы [7] показано, что критические концентрации твердых частиц, начиная с которых проявляется эффект запирания, существенно ниже соответствующих значений, которые следуют из расчетов, основанных на статистическом характере столкновений частиц в неоднородном ламинарном потоке, приводящих к образованию арочных структур.

Обратные эмульсии, представляя интерес с практической точки зрения в связи с применением в нефтедобывающей отрасли, являются также объектом внимания в области медицины для изучения различных транспортных явлений в кровеносных сосудах и, в частности, эффекта динамического запирания в капиллярах, соизмеримых с размерами сосудов человека [8]. Наблюдаемый эффект запирания в условиях, близких к условиям живых организмов, как считают авторы этой работы, может являться одной из причин возникновения инфаркта. Кровь, с точки зрения исследования протекающих в ней гидродинамических процессов, представляет собой дисперсную систему, состоящую из плазмы с

содержанием определенной концентрации эритроцитов, аналогичных по своей эластичности микрокаплям воды. При этом структура течения рассматривается как скольжение эритроцитов в «смазочном» слое плазмы с деформацией по направлению потока крови [8], на основании чего нам представляется сложным объяснение наблюдаемого в этой работе эффекта запираания трением [1] или образованием арочных структур в капиллярных каналах [6–7]. Более того, из логических соображений следует, что образованию таких структур должны способствовать процессы коллективного дальнего действия характера, непрерывно протекающие при течении дисперсионной среды. Это обстоятельство подтверждается результатами работы [9], в которой с целью воспроизведения блокировки такого течения в результате эффекта динамического запираания выполнено моделирование течений эмульсии в микроканалах различной формы. При этом показано, что существенное замедление течения этой эмульсии может быть достигнуто только за счет взаимного притяжения оболочек ее капель. Это означает, что механизм запираания обусловлен не силами трения между капельками, а силами притяжения, зависящими, очевидно, от расстояния между ними.

В работе [10] был предложен основанный на гидродинамической модели механизм образования упорядоченных структур, как в эмульсиях, так и в суспензиях, приводящий к эффекту запираания. Суть этого механизма заключается в следующем.

В обратных углеводородных эмульсиях (суспензиях), как правило, плотность воды (твердых тел) больше плотности несущей фазы, вследствие чего при течении инвертной эмульсии (суспензии), в отличие от прямой, скорость несущей фазы больше скорости капелек воды (твердых частиц). Это обстоятельство – наличие относительной скорости между дисперсионной средой и дисперсной фазой, что наблюдается в обратных эмульсиях и суспензиях – является необходимым для наблюдения эффекта запираания условием. Кроме того, частицы дисперсной фазы (далее – шарики) с определенной вероятностью могут затормаживаться у входа в капилляр, что еще в большей степени увеличивает относительную скорость между ними. При этом в сужающемся пространстве между шариками, согласно уравнению неразрывности, скорость потока увеличивается. Это приводит к тому, что давление p_2 в области между шариками становится меньше внешнего давления p_1 , вследствие чего они испытывают силу притяжения, которая по характеру взаимодействия является центральной. В результате проведенных расчетов получено выражение для перепада давления

$$\Delta p = p_1 - p_2 = p_0 \left[\left(\frac{(z+2)^2}{(z+2)^2 - 4} \right)^2 - 1 \right], \quad (1)$$

где p_0 – динамическое давление, z – параметр, равный отношению расстояния между ними к их диа-

метру ($z=l/d$). Этот перепад давления приводит к возникновению поперечной гидродинамической силы притяжения между шариками.

Расчеты проведены для случая, когда в плоскости, перпендикулярной к направлению потока, находятся 4 шарика. Можно брать произвольное количество шариков в зависимости от формы и плотности их упаковки; при этом с некоторыми отклонениями в количественном отношении полученные результаты качественно совпадают.

На рис. приводится рассчитанная по формуле (1) зависимость относительной разности давлений от параметра z . Как видно, с уменьшением z разность давлений возрастает; при $z = 1.74$ перепад давления $\Delta p = p_0$, т.е. давление между шариками вдвое меньше давлений с наружных сторон. При этом расстояние между центрами шариков $L = l + d = 2.74d$. Эти возникающие между частицами области пониженного давления приводят к явлению самофокусировки шариков вдоль наибольшего потока движения несжимаемой жидкости. Поэтому в зависимости от формы линий токов, обусловленной конфигурацией емкости, образованные упорядоченные структуры также могут иметь различные формы. Например, в [1; 7] формируются арочные структуры у входа в капилляр; в прямых капиллярах – нитевидные цепочечные структуры в приосевых областях.

В случае $z \rightarrow 0$, что возможно при $l \rightarrow 0$ (шарики приближаются) или $d \rightarrow \infty$ (вход капилляра перекрывается одним шариком), как следует из выражения (1), разность давлений стремится к бесконечно большому значению. Другой предельный случай, когда $\Delta p = 0$, имеющий место при $z \rightarrow \infty$, наблюдается либо в отсутствии шариков ($d = 0$), либо когда они располагаются на бесконечно больших расстояниях друг от друга ($l \rightarrow \infty$), что с физической точки зрения также означает их отсутствие.

Рис. Рассчитанная зависимость относительной разности давлений от параметра z . В правом верхнем углу приводится зависимость в области малых z .

Если перейти к экспериментальным фактам [1], то при течении эмульсии микрокапельки воды,

аналогично шарикам как в вышеуказанном случае, из-за разности давлений прижимаются друг к другу. При этом перед входом в микроканал сначала образовывается один слой «связанных» капелек, затем второй и т.д., что обусловлено ускоренными потоками жидкости между глобулами воды, приводящими к их взаимному притяжению. Поэтому потоки жидкости между капельками, имеющие в локальном отношении разные (но в усредненном – к входу капилляра) направления, обеспечивают коллективное притяжение частиц друг к другу. Так происходит образование относительно устойчивых структур у входа в капилляр, которые наблюдались в работах [1–7]. При этом следует утверждать о возникновении упорядоченных относительно линий тока структур из частиц дисперсной фазы, что аналогично эквипотенциальным поверхностям электрического поля. Об этом свидетельствует образование линий «изобар» в эмульсиях [1–2] и возникновение арочных структур из твердых частиц в суспензиях у входа в микроканал [6–7], форма которых напоминает эквипотенциальные поверхности.

По мере приближения микрокапель воды друг к другу ($z = l/d$ уменьшается) разность давлений возрастает, что способствует дальнейшему их приближению. Таким образом, этот процесс необратимо усугубляется так, что капельки воды плотно «прижимаются» друг к другу и, упруго деформируясь, полностью перекрывают вход для эмульсии. Этот случай соответствует течению стабилизированной эмульсии. В случае течения эмульсии без стабилизатора, очевидно, будет происходить слияние капелек воды, о чем свидетельствует наблюдаемое в [1] интенсивное выделение водной фазы.

Оценим минимальную концентрацию эмульсии, начиная с которой возможно образование упорядоченных структур, приводящих к эффекту запирания. Пусть вода объемом $V_1 = N V_0$, где N – общее число микрокапель, $V_0 = 1/6 \pi d^3$ – объем одной капельки воды, равномерно диспергирована в углеводороде. Поделив V_1 на общий объем эмульсии, находим концентрацию водной фазы: $c = n V_0$, где n – концентрация глобул воды. Оптимальная упаковка микрокапель воды для заданной концентрации достигается при «шашечной» структуре их размещения в объеме, при которой, как несложно показать, $n = (\sqrt{3} L/2)^{-3}$. С использованием последних выражений можно найти, что среднее расстояние между микрокаплями $L \approx d (0.8/c)^{1/3}$, которое, в свою очередь, позволяет определить параметр $z = l/d = L/d - 1 \approx (0.8/c)^{1/3} - 1$. Например, рассчитанное его значение для концентрации водной фазы 50% равно примерно 0.17. При этом, как видно из рис.2, давление в области между глобулами воды примерно в 50 раз меньше по сравнению с внешним давлением. Из графической зависимости $\Delta p(z)$ (рис.) следует, что заметное изменение разности давлений наблюдается при

$z \approx 0.4$, чему соответствует минимальная концентрация водной фазы, равная примерно 30%.

Этим же механизмом можно объяснить экспериментальные факты образования четочной структуры в эмульсиях [1; 11] и локализации эритроцитов в приосевых областях при течении крови [8] в цилиндрических микроканалах. Как известно [12], радиальное распределение скорости потока жидкости при ламинарном течении имеет параболическую форму:

$$v = v_0 \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right), \quad (2)$$

где R – радиус капилляра, v_0 – скорость потока на оси трубки. Вследствие такого градиента скорость течения у ближней к стенке части уединенной капельки меньше скорости со стороны оси трубки. Поэтому согласно уравнению Бернулли возникает разность давлений Δp , а следовательно, и сила, действующая на шарик радиально в осевом направлении. По этой причине ансамбль капелек, равномерно распределенных в объеме жидкости, с течением времени будет выстраиваться в цепочку вдоль оси трубки. В случае с водонефтяной эмульсией плотная упаковка водяных капелек может привести к «разрыву» их упругих оболочек и выделению водной и нефтяной фаз [1]. Этому также, по видимому, способствует вращение капелек вокруг собственных осей, обусловленное радиальным градиентом скоростей и приводящее к возникновению сил трения скольжения и качения.

Проведем оценку времени установления эффекта запирания в нулевом приближении. Уравнение движения уединенной капельки массы m в радиальном направлении можно записать в виде:

$$ma = \Delta p S - 3\pi\mu d U, \quad (3)$$

где S – площадь сечения шарика, μ – вязкость жидкости, U – скорость дрейфа капельки. По мере приближения частицы к оси капилляра согласно (1) Δp , а, значит, и скорость ее движения возрастает. Для упрощения решения задачи примем, что $v(r)$ имеет не параболическую (2), а линейную зависимость с такими же крайними условиями. Тогда из выражения (3) для установившегося движения ($a=0$) с учетом уравнения Бернулли получаем, что время прохождения частицы от стенок капилляра до его оси $\tau = \frac{6\mu}{2\rho v_{cp}^2} \left(\frac{R}{d}\right)^3$, где средняя скорость $v_{cp} = v_0/2$. Эту величину можно принять за время наступления динамического запирания в цилиндрических капиллярах, характеризующее этот процесс. Как видно из этого выражения, имеет место очень сильная зависимость от соотношения между диаметрами капилляра и частицы. Это также подтверждается результатами работы [1], в которой установлено, что, проявляясь в диапазоне $2R \sim (40-250)$ мкм, этот эффект не обнаруживается при $2R = 600$ мкм.

Рассчитанное время наступления запирания для крови при условиях экспериментов [8] состав-

ляет около 140 с, в то время как экспериментально наблюдаемое время равно примерно 1 700 с. Такое существенное различие объясняется несколькими факторами: линейная аппроксимация $v(r)$, сферически-несимметричная форма эритроцитов. Но главным фактором является то, что это выражение получено для уединенной частицы. Поэтому при коллективном движении из-за взаимного расталкивания частиц это время увеличивается

Предлагаемый механизм вполне корректно объясняет следующие экспериментальные закономерности. Во-первых, эффект динамического запираания наблюдается в суспензиях и только в обратных эмульсиях, в которых возможно возникновение разности скоростей между дисперсионной средой и дисперсной фазой. Во-вторых, эти силы взаимодействия являются дальнедействующими, что видно из монотонной зависимости уменьшения объемного расхода жидкости через капилляр. В-третьих, предложенный механизм позволяет также на качественной и количественной основе объяснять эффект запираания в цилиндрических капиллярах, следствием которого являются возникновение поршневого режима в эмульсиях [1] и образование нитевидной структуры эритроцитов в приосевых областях [8]. В-четвертых, эффект блокировки в суспензиях [6] исключает роль поверхностно-активных веществ в возникновении трения между частицами. Кроме того, как отмечено в [7], расчетные значения критических концентраций твердых частиц, начиная с которых проявляется эффект запираания, значительно выше соответствующих экспериментальных значений. Действительно, поскольку авторы [6–7] объясняют этот эффект статистическим характером столкновений частиц, то при больших концентрациях частиц вероятность образования арочной структуры у входного канала капилляра возрастает. В этом случае напорное давление жидкости будет передаваться на опоры, роль которых играют торцевые части капилляра, которые уравнивают параллельную и перпендикулярную (распор) составляющие внешнего давления.

Таким образом, на основе качественного анализа и путем проведения простых расчетов предложен единый для обратных эмульсий и суспензий механизм образования упорядоченных структур, который приводит к эффекту динамического запираания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметов А. Т., Саметов С. П. Особенности течения дисперсии из микрокапель воды в микроканалах // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 21. С. 21–28.
2. Ахметов А. Т., Валиев А. А. Влияние агрегатного состояния дисперсной фазы на гидродинамические и реологические свойства эмульсий и суспензий // Мат-лы V Всероссийской конференции с междунар. участием «Многофазные системы: теория и приложения». Уфа, 2012. С. 18–21.
3. Рахимов А. А., Ахметов А. Т. Экспериментальные исследования гидродинамических эффектов при течении обратных водоуглеводородных эмульсий в микроканалах // Труды Института механики им. Р. Р. Мавлютова. 2016. Т. 11. №1. С. 30–37.
4. Саметов С. П. Гидродинамические эффекты при течении эмульсий в осесимметричных микроканалах: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 2011. 114 с.
5. Рахимов А. А. Экспериментальные исследования течения водоуглеводородных и биологических дисперсий в микроканалах: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 2014. 183 с.
6. Sharp V. Kendra, Ronald J. Adrian. Shear-induced arching of particle-laden flows in microtubes // CD-ROM Proceedings International Mechanical Engineering Congress and Exposition. November 11–16. New York, 2001.
7. Eiichiro Yamaguchi, Ronald J. Adrian. Theoretical and Experimental Study of MicroChannel Blockage Phenomena // XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM04). Warsaw, Poland, 2004. 445 p.
8. Ахметов А. Т., Закиров К. Р., Саметов С. П. Особенности течения крови в капиллярах при малых перепадах давления // Труды Института механики УНЦ РАН, Уфа, 2008. В. 6. С. 13–18.
9. Маланичев И. В., Ахмадиев Ф. Г. Процессы переноса в реологических средах. Моделирование течения неньютоновских эмульсий в микроканалах // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. №6. С. 1431–1436.
10. Шайхитдинов Р. З., Мустафин И. А. Образование кристаллических структур в комплексной плазме // Вестник Башкирского университета. 2012. №3. С. 1196–1203.
11. Рахимов А. А. Изучение эффекта динамического запираания в микроканале, влияние включений // Вестник Башкирского университета. 2013. №2. С. 344–349.
12. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1. Механика. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2002. С. 506.

Поступила в редакцию 17.04.2018 г.

MECHANISM OF FORMATION OF THE DYNAMIC LOCKING EFFECT IN DISPERSE SYSTEMS

© R. Z. Shaikhutdinov^{1*}, D. T. Gatiyatullin¹, I. A. Mustafin²

¹*Bashkir State University*

32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

²*Ufa State Petroleum Technological University*

1 Kosmonavtov Street, 450062 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

Phone: +7 (347) 229 97 19.

**Email: plasma@bsunet.ru*

A mechanism of the dynamic locking effect experimentally observed in inverse water-oil emulsions and suspensions. The essence of this mechanism is that the continuous phase is accelerating, while it is flowing in a narrowed space between the liquid or solid particles of the dispersed phase; the result of the acceleration is narrowing of the field and dropping of the pressure according to Bernoulli's equation. This leads to formation of pressure difference in the space between the dispersed phase particles and their external sides and, consequently, to formation of the ordered structure of these particles that lock capillaries. Calculations show that in the experiment, when the locking effect was observed, the pressure between the particles was able to reach the values up to three orders of magnitude higher than the pressure on their outer sides. Calculated critical concentration of water globules approximately coincide with the experimental values. The proposed mechanism is quite correctly explains the experimental patterns. The effect of dynamic locking is observed in suspensions and only in reverse emulsions, in which it is possible to create a velocity difference between the dispersion medium and the dispersed phase. The nature of interaction forces is long-ranged, as it can be seen from the monotone dependence of reducing the volume flow of liquid through the capillary. The proposed mechanism also makes it possible to explain the effect of locking in cylindrical capillaries on a qualitative and quantitative basis. The consequence of this effect is the emergence of a piston mode in emulsions and the formation of a threadlike structure of red blood cells in the axis regions. The locking effect in suspensions excludes the role of surfactants in the occurrence of friction between particles.

Keywords: dynamic locking effect, hydrodynamics, disperse systems, emulsions, suspensions.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Akhmetov A. T., Sametov S. P. Pis'ma v ZhTF. 2010. Vol. 36. Vol. 21. Pp. 21–28.
2. Akhmetov A. T., Valiev A. A. Mat-ly V Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunar. uchastiem «Mnogofaznye sistemy: teoriya i prilozheniya». Ufa, 2012. Pp. 18–21.
3. Rakhimov A. A., Akhmetov A. T. Trudy Instituta mekhaniki im. R. R. Mavlyutova. 2016. Vol. 11. No. 1. Pp. 30–37.
4. Sametov S. P. Gidrodinamicheskie efekty pri techenii emul'sii v osesimmetrichnykh mikrokanalakh: diss. ... kand. fiz.-mat. nauk. Ufa, 2011.
5. Rakhimov A. A. Eksperimental'nye issledovaniya techeniya vodouglevodorodnykh i biologicheskikh dispersii v mikrokanalakh: diss. ... kand. fiz.-mat. nauk. Ufa, 2014.
6. Sharp V. Kendra, Ronald J. Adrian. Shear-induced arching of particle-laden flows in microtubes. CD-ROM Proceedings International Mechanical Engineering Congress and Exposition. November 11–16. New York, 2001.
7. Eiichiro Yamaguchi, Ronald J. Adrian. Theoretical and Experimental Study of MicroChannel Blockage Phenomena. XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM04). Warsaw, Poland, 2004.
8. Akhmetov A. T., Zakirov K. R., Sametov S. P. Trudy Instituta mekhaniki UNTs RAN, Ufa, 2008. Vol. 6. Pp. 13–18.
9. Malanichev I. V., Akhmadiev F. G. Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. 2015. Vol. 88. No. 6. Pp. 1431–1436.
10. Shaikhutdinov R. Z., Mustafin I. A. Vestnik Bashkirskogo universiteta. 2012. No. 3. Pp. 1196–1203.
11. Rakhimov A. A. Vestnik Bashkirskogo universiteta. 2013. No. 2. Pp. 344–349.
12. Sivukhin D. V. Obshchii kurs fiziki. Vol. 1. Mekhanika [General course of physics. Vol. 1. Mechanics]. Moscow: FIZMATLIT. 2002. Pp. 506.

Received 17.04.2018.