

УДК 532.135; 532.5

# ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ИНФАРКТА

*А. Т. Ахметов, К. Р. Закиров, С. П. Саметов*

Институт механики УНЦ РАН, Уфа

**Аннотация.** Вслед за обнаружением эффекта динамического запираания обратных водо-углеводородных дисперсий (микрокапли воды в углеводороде) был обнаружен подобный эффект при течении в капиллярах биологической дисперсной среды — крови (эритроциты в плазме). В экспериментах использовалась кровь с различным содержанием эритроцитов. Добавление в качестве консерванта глюцира, применяемого традиционно при донорских заборах, уменьшает концентрацию крови на 10%, а этилен-диаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) практически сохраняет исходную концентрацию. Уменьшение давления до 20 кПа и ниже приближает гидравлические условия к живым организмам. Оказывается, что обнаруживаемое при таких условиях динамическое запираание более устойчиво и может лечь в основу одного из возможных механизмов возникновения инфаркта.

**Ключевые слова:** гидродинамика дисперсных систем, эмульсия, суспензия, капилляр, запираание течения, кровь, эритроциты, инфаркт

---

## 1. Введение

Явление динамического запираания впервые было обнаружено при течении в капиллярных каналах высококонцентрированных обратных водо-нефтяных эмульсий. Эффект состоит в том, что со временем течение замедляется и вскоре совсем останавливается, несмотря на постоянно действующий перепад давления [1]. Эффект запираания проявляется при течении через капилляры разного диаметра: 40 мкм, 100 мкм, 250 мкм; при

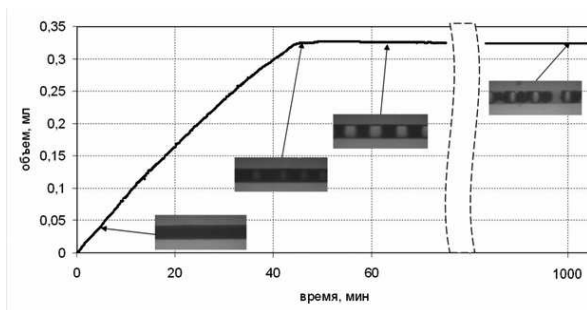


Рис. 1. Эффект динамического записания обратной водонефтяной эмульсии в капилляре

течении разных типов эмульсий: по составу и реологическому поведению. Использовались обратные и прямые эмульсии с разным соотношением дисперсионной среды и дисперсной фазы (70:30, 48:52), с разным компонентным составом (минерализованная, дистиллированная вода, нефть, гексан, дизельное топливо). Высококонцентрированные стабилизированные искусственным эмульгатором (Нефтенол) обратные эмульсии проявляли реопектические свойства, высококонцентрированные нестабилизированные обратные эмульсии проявляли тиксотропные свойства. Малоцентрированные стабилизированные прямая и обратная эмульсии не проявляют неньютоновских свойств. Общим для всех исследованных эмульсий является то, что при проталкивании, при постоянно действующем перепаде, давления дисперсий жидкость–жидкость через капилляры их движение со временем останавливается (Рис. 1).

## 2. Экспериментальная часть

Следующим объектом исследования в качестве дисперсной среды явилась человеческая кровь, в которой эритроциты по своей эластичности близки к микрокаплям. Кровь представляет собой взвесь дисперсных частиц: эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов, так называемых форменных элементов, в несущей жидкости — плазме крови. Эритроциты, чья концентрация в крови на несколько порядков больше, чем остальных форменных элементов, имеют форму сплюснутых сфер диаметром 6–8 мкм и составляют 50% от общего объема. Течение крови в капиллярах диаметром 100 мкм при постоянно действующем перепаде давления с течением времени приостанавливается. Эксперименты по течению крови и эмульсии в капилляре производились на установке, схематическое

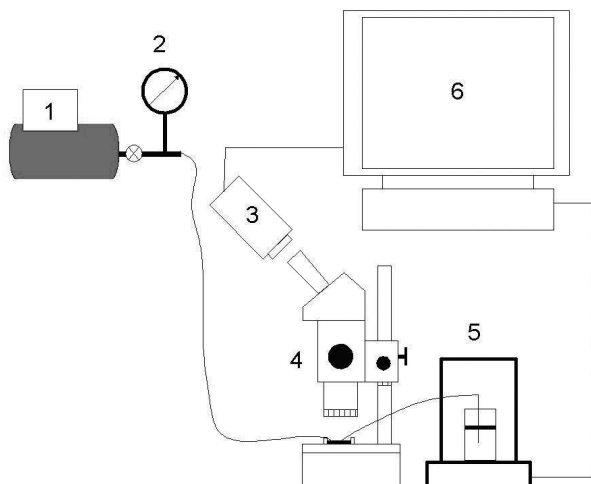


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментальной установки: 1 — компрессор, 2 — манометр, 3 — цифровая видеокамера, 4 — стереоскопический микроскоп, 5 — электронные весы, 6 — компьютер

изображение которой представлено на Рис. 2. Под давлением, создаваемым компрессором 1, исследуемая жидкость по подводящим трубкам поступала в капилляр, первоначально заполненный водой. Вытесняемая дистиллированная вода по отводящим трубкам подавалась в стаканчик с водой, располагавшийся на электронных весах 5 НМ 200 (с дискретностью 0.1 мг), сопряженных с компьютером 6. Таким образом, вес дистиллированной воды пересчитывался в объем протекшей через модель жидкости. С целью уменьшения погрешностей, связанных с испарением воды, на нее наливался тонкий слой машинного масла. Давление в системе фиксировалось манометром 2. Движение эмульсии возможно было наблюдать как в макро, так и в микромасштабе (с помощью микроскопа 4). Процесс течения регистрировался на видеокамеру 3. Перед проведением опытов капилляры промывались бензином или петролейным эфиром, спиртом и водой. Радиус капилляра определялся при помощи окуляра-микрометра. Перед проведением экспериментов с исследуемой жидкостью замеряли расход по воде, по величине которого проводилась калибровка гидродинамической системы.

Были проведены две серии экспериментов. Обычно для предотвращения коагуляции эритроцитов в объем крови добавляется раствор глюцира в соотношении 2 к 10. В свежей крови форменные элементы составляют около 45% объема [2], в крови, разбавленной глюциром, формен-

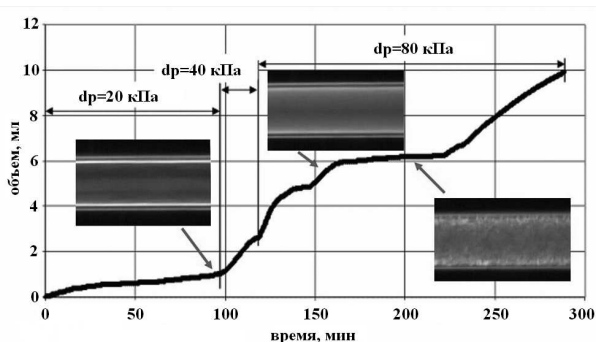


Рис. 3. Течение крови, разбавленной глицерин в капилляре диаметром 100 мкм при ступенчатом увеличении перепада давления

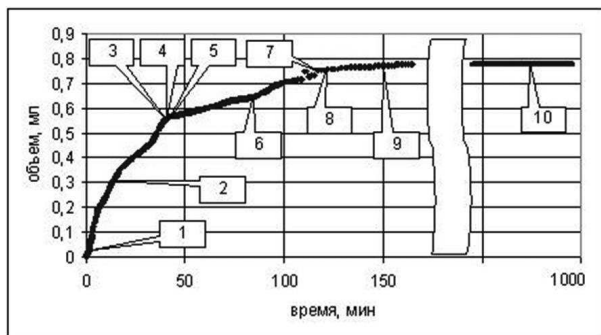


Рис. 4. Течение крови с ЭДТА в капилляре диаметром 100 мкм при постоянном перепаде давления 20 кПа

ные элементы составляют около 37% объема. Такая кровь использовалась в первом эксперименте при разных постоянно действующих перепадах давления: 20 кПа, 40 кПа, 80 кПа, которые увеличивали ступенчато (Рис. 3). Течение крови с глицерин проявляет свойство записания, однако записание не столь стабильно как в случае с эмульсиями [3].

В другом эксперименте использовалась кровь с добавлением этилендиамин-тетрауксусной кислоты (ЭДТА) в качестве консерванта, его объем незначителен. Использовался небольшой перепад давления, более близкий к условиям живых организмов, — 20 кПа (Рис. 4). При течении крови с ЭДТА переход в состояние записания происходит не монотонно. Действие мощного УЗ воздействия (3 мин) видимых изменений не

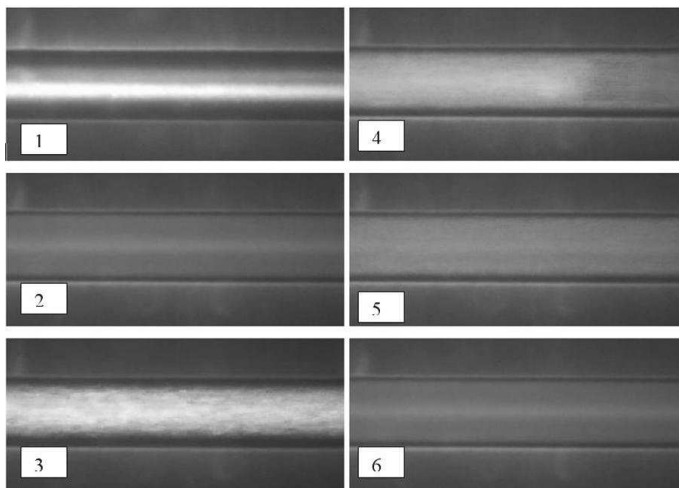


Рис. 5. Микроизображения течения крови в капилляре (съемка проведена при проходящем свете — на светлом фоне)

обнаружило, лишь при механическом воздействии на капилляр течение возобновлялось на короткое время.

Картина, наблюдаемая в капилляре через микроскоп в процессе запирирования крови, несколько отличается от структур, наблюдаемых в капиллярах при запирировании водоуглеводородных эмульсий (Рис. 5 и 6). Обратим внимание, что кадры, изображенные на Рис. 5, получены при измерении на микроскопе МБС-9 в проходящем свете. Таким образом, на светлом фоне плазма крови (преимущественно прозрачная) имеет светлую окраску. На Рис. 6 кадры получены на микроскопе Stemi-2000С с боковым освещением на темном фоне (кадр 9 — темные участки соответствует плазме).

В случае запирирования водонефтяных эмульсий наблюдается квазипериодическая структура, состоящая из четок воды, нефти и самой эмульсии (Рис. 1), при запирировании крови процесс отличен от начала нагнетания до конца процесса. При течении крови в капиллярах наблюдается пристеночный эффект [4], при котором увеличивается концентрация эритроцитов вблизи центра. При сокращении расхода крови через капилляр происходят пульсации движения, течение приостанавливается и вновь возобновляется с последующим уменьшением расхода, что является общим для переходных процессов в состоянии запирирования.

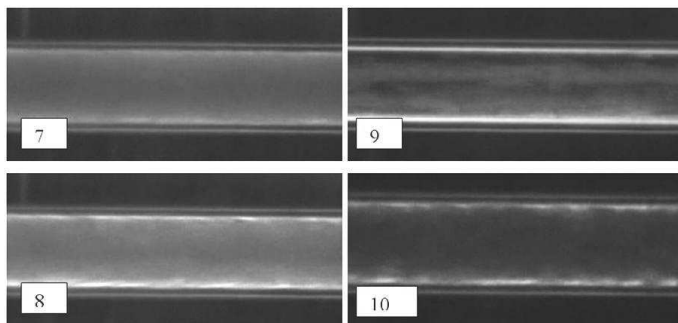


Рис. 6. Микроизображения течения крови в капилляре (съемка проведена при боковом освещении — на темном фоне)

### 3. Заключение

Эффект запирания крови был обнаружен при различных перепадах давления от 20 кПа до 100 кПа. В отличие от экспериментов на водоуглеводородных эмульсиях состояние запирания крови нестабильно. Использование крови с различными консервантами (ЭДТА и глюцидир) на режиме запирания сказывается незначительно. Обнаруженный эффект запирания крови в стеклянном капилляре может рассматриваться как одна из причин возникновения инфаркта в кровеносной системе живых организмов со стенозами.

### Список литературы

- [1] Akhmetov A. T., Telin A. G., Glukhov V. V., Dynamic Blocking at the Flow of Invert Water-Oil Emulsions // Abstracts of XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM04). 2004. P. 162.
- [2] Педли Т. Гидродинамика крупных кровеносных сосудов М.: Мир. 1983. 400 с.
- [3] Закиров К. Р., Саметов С. П., Ахметов А. Т. Неожиданный механизм возникновения инфаркта // Сборник трудов ИМех УНЦ РАН. 2006. 307 с.
- [4] Павловский Ю. Н. О пристеночном эффекте // Механика жидкостей и газов. 1967. № 2.