

УДК 531/534: [57+61]

ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ОТДЕЛЬНЫХ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРОВИ В ИЗМЕНЕНИИ ЕЕ ТЕКУЧЕСТИ И ТРАНСПОРТНОГО ПОТЕНЦИАЛА

А.В. Муравьев¹, И.А. Тихомирова¹, С.В. Булаева¹, В.А. Вдовин¹, А.А. Муравьев²

¹ Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского, Россия, 150000, Ярославль, ул. Республиканская, 108, e-mail: alexei.47@mail.ru

² Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Россия, 150000, Ярославль, ул. Советская, 14, e-mail: anton@yspu.yar.ru

Аннотация. В опытах с использованием цельной крови и суспензий эритроцитов с разной концентрацией клеток (от 20 до 55%) было изучено влияние гематокрита (Hct) на текучесть крови и ее транспортный потенциал. Получены уравнения, удовлетворительно описывающие влияние изменений концентраций эритроцитов на текучесть крови и показывающие степень ее неньютоновости в этих условиях. Показано, что при низкой ($Hct = 20\%$) и при высокой концентрации эритроцитов ($Hct = 55\%$) клеточная суспензия проявляет при течении неньютоновские свойства и это течение хорошо описывается уравнением жидкости степенного закона. При исследовании крови с разной вязкостью плазмы было показано, что вклад последней в текучесть цельной крови был меньше, чем гематокрита ($Hct = 43\%$) и составил 27%. Анализ влияния гематокрита и вязкости плазмы на текучесть крови и ее транспортные возможности показал, что наилучшим транспортным потенциалом обладала кровь при ее относительно низкой вязкости, со средней величиной гематокрита (43,5%), низкой вязкостью плазмы (1,72 мПа·с) и хорошей деформируемостью эритроцитов. При моделировании разной вязкости суспензионной среды применением растворов декстрана 70 (в концентрации 1, 2 и 3%), было подтверждено, что наибольшим транспортным потенциалом обладает суспензия эритроцитов с самой низкой вязкостью среды (1% декстран). Течение суспензий с низкой, средней и относительно высокой вязкостью удовлетворительно описывается уравнением жидкости степенного закона с высокой степенью достоверности аппроксимации экспериментальных данных (99%). Установлено, что с повышением вязкости суспензионной среды увеличивается эффективность потоковой деформации эритроцитов.

Ключевые слова: кровь, суспензия, реологические свойства, гематокрит, вязкость плазмы, деформируемость эритроцитов, транспортный потенциал, неньютоновские свойства, уравнения течения.

ВВЕДЕНИЕ

Приспособление текучести крови (величины обратной вязкости) к запросам тканей на доставку кислорода связано с изменением ее пяти основных реологических факторов [2]. К ним относятся: вязкость плазмы, гематокрит, сдвиговые условия (скорость и/или напряжение сдвига), агрегация и деформируемость эритроцитов.

© Муравьев А.В., Тихомирова И.А., Булаева С.В., Вдовин В.А., Муравьев А.А., 2012

Муравьев Алексей Васильевич, д.б.н., профессор кафедры медико-биологических основ спорта, Ярославль

Тихомирова Ирина Александровна, д.б.н., профессор, зав. кафедрой основ медицинских знаний и охраны здоровья детей, Ярославль

Булаева Светлана Владимировна, к.б.н., с.н.с. лаборатории прикладной физиологии, Ярославль

Вдовин Вадим Александрович, аспирант кафедры физики, Ярославль

Муравьев Антон Алексеевич, к.б.н., доцент кафедры физического воспитания, Ярославль

Наиболее существенное влияние на вязкость цельной крови, особенно в крупных сосудах, оказывает концентрация эритроцитов (гематокрит). Между гематокритом и вязкостью крови существует высокая степень взаимосвязи [8, 15, 16, 20]. Кроме того, соотношение гематокрита и вязкости крови важно для оценки транспортных возможностей крови, при доставке с ее помощью кислорода в ткани [25].

Вместе с тем, точных и исчерпывающих сведений о вкладе в текучесть цельной крови таких ключевых характеристик [2, 8] как вязкость суспензионной среды, гематокрита, сдвиговые условия, деформационные характеристики эритроцитов и их агрегации явно недостаточно, чтобы сделать обобщающие выводы об эффективности транспортной функции крови. Не предложены математические модели, описывающие связи выше указанных факторов текучести крови с транспортом ею веществ и дыхательных газов. С учетом вышесказанного была сформулирована цель настоящего исследования как изучение роли макро- и микрореологических свойств крови в изменениях ее текучести и транспортного потенциала..

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено на образцах крови практически здоровых доноров-мужчин в возрасте 20–34 лет ($n = 84$). Кровь для анализов получали венопункцией. Для исследований использовали эритроциты после отделения их от плазмы центрифугированием и трехкратным отмыванием в изотоническом растворе (NaCl).

Для достижения поставленной цели общая популяция лиц последовательно разбивалась на группы на основе предварительного анализа характеристик гемореологического профиля:

1. Для анализа роли гематокрита (Hct) было выделено четыре группы. В первую группу были включены лица ($n = 20$) с Hct от 35 до 40%, во вторую ($n = 22$) – от 41 до 45%, в третью ($n = 22$) – от 46 до 50% и в четвертую группу – ($n = 20$) вошли лица с Hct – более 50%.

2. Для оценки вклада вязкости плазмы из общего числа исследованных лиц было выделено и сформировано также четыре группы. Первую группу составили лица ($n = 20$) с вязкостью плазмы от 1,70 до 1,79 мПа·с, вторую группу ($n = 22$) – от 1,80 до 1,89 мПа·с, третью группу ($n = 22$) – от 1,90 до 2,0 мПа·с и четвертую группу ($n = 20$) – более 2,0 мПа·с.

Моделирование влияния различных реологических факторов на текучесть крови *in vitro*

С целью уточнения вклада реологических факторов в текучесть цельной крови и эффективность транспорта был поставлен ряд модельных опытов. Для оценки роли гематокрита были приготовлены суспензии эритроцитов в изотоническом растворе хлорида натрия с Hct от 20 до 55% с «шагом» в 5%.

Роль вязкости плазмы в текучести крови была исследована на суспензиях эритроцитов ($Hct = 40\%$) с заменой плазмы на стандартные растворы декстрана с молекулярной массой 70 килодальтон (декстран 70). В исследовании были использованы три концентрации декстрана 10 г/л, 20 г/л и 30 г/л с вязкостью: 1,36, 1,66 и 2,08 мПа·с соответственно.

Вязкость цельной крови, плазмы и суспензий эритроцитов измеряли на полуавтоматическом капиллярном вискозиметре при шести напряжениях сдвига ($0,20\text{--}2,00 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$). Принимали за текучесть крови величину обратную ее вязкости (текучесть = $1/\text{вязкость}$ [8]). Оценку деформируемости эритроцитов проводили измерением индекса удлинения эритроцитов (ИУЭ) [7] и в том числе в среде декстрана разных концентраций в изотоническом растворе (NaCl) и определение вязкости суспензий эритроцитов ($Hct = 40\%$). Рассчитывали индекс ригидности эритроцитов (Tk) из данных регистрации вязкости крови, плазмы и гематокрита [14].

Определение показателя гематокрита (Hct) цельной крови и приготовленных суспензий эритроцитов проводили на микрогематокритной центрифуге СМ-70 (Латвия).

Реологическую эффективность транспорта кислорода (TO_2) оценивали отношением гематокрита к вязкости крови [13]:

$$TO_2 = Hct / BK$$

где Hct – гематокрит (%), а BK – вязкость крови (мПа·с).

Агрегацию эритроцитов определяли методом оптической микроскопии с последующей видеорегистрацией и компьютерным анализом изображения [5] и при помощи полуавтоматического агрегометра (модель *Myrenne M1*, Германия).

Статистическую обработку полученных цифровых материалов и все виды анализа результатов, включая корреляционный и регрессионный, проводили, используя табличный редактор *Microsoft Excel*. На основе корреляционного анализа (r – коэффициент корреляции) рассчитывали коэффициент детерминации ($KД = r^2 \times 100\%$) для определения вклада разных реологических характеристик в текучесть цельной крови.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ данных исследования гемореологического профиля показал, что текучесть крови на 43% связана с концентрацией эритроцитов. Поскольку корреляция между вязкостью крови и плазмы была менее выраженной, то коэффициент детерминации составил всего 27%. Из расчета КД следует, что вклад деформируемости в текучесть крови должен составить около 20% (коэффициент корреляции – 0,447). Вязкость крови при низких скоростях сдвига слабо коррелировала с агрегацией эритроцитов ($r = 0,210$), поэтому ее вклад в текучесть крови не превышал 4%. В целом распределение вклада реологических факторов в текучесть цельной крови представлено на рис. 1.

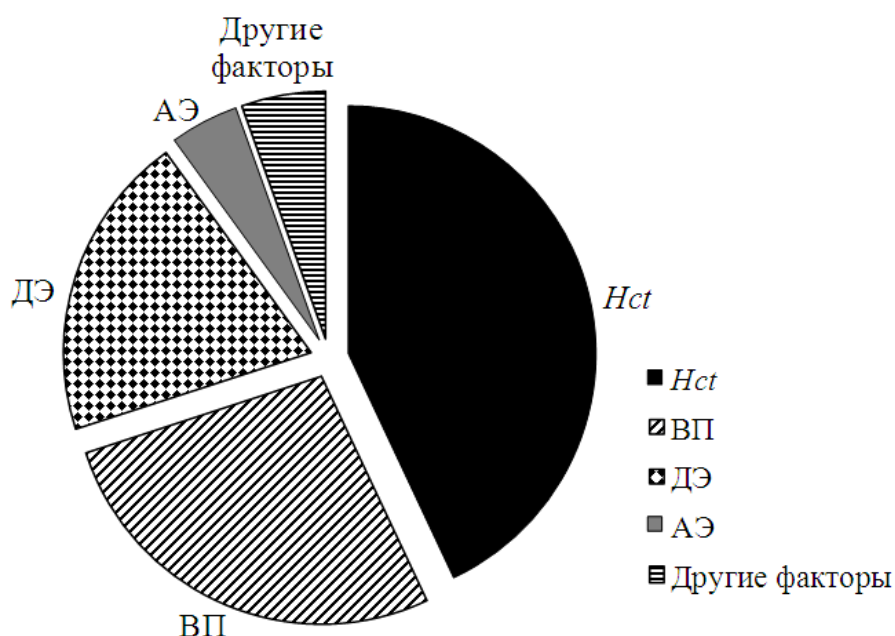


Рис. 1. Распределение реологических факторов, дающих вклад в величину текучести цельной крови: Hct – гематокрит; ВП – вязкость плазмы; ДЭ – деформируемость эритроцитов; АЭ – агрегация эритроцитов; другие факторы (например, условия сдвига)

Роль гематокрита в изменениях текучести крови и ее транспортного потенциала

У лиц с возрастающим гематокритом (значения Hct варьировали от 35,8% до 52,4%) прирост вязкости крови при высоких напряжениях сдвига описывается уравнением регрессии вида: $y = 0,098x + 0,156$ (при достоверности аппроксимации данных 96%). Из полученного регрессионного соотношения следует, что прирост Hct на единицу должен вызвать увеличение вязкости крови на 0,096 мПа·с. При изучении вклада гематокрита в вязкость на модели течения суспензий клеток в условиях повышения их концентрации (Hct) от 20 до 55%, была получена сходная величина прироста вязкости на единицу изменения гематокрита, равная 0,104 мПа·с (при достоверности аппроксимации данных этой регрессионной моделью – 99%; рис. 2).

Корреляции показателя текучести крови и индекса транспорта кислорода были положительными во всех четырех группах, однако самая высокая была выявлена в группе 2, с коэффициентом корреляции, равным 0,843 ($p < 0,05$). Регистрация вязкости суспензий проводилась при шести напряжениях сдвига и построенные кривые течения суспензии эритроцитов как с гематокритом 20%, так и с его величиной 55% хорошо описывались реологической моделью степенного закона. Это хорошо иллюстрирует степень неньютоновости (сдвиговое разжижение) исследуемых суспензий.

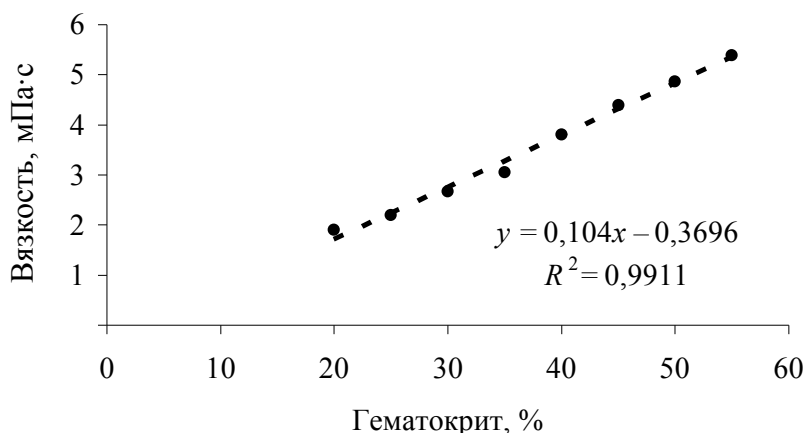


Рис. 2. Связь гематокрита и вязкости суспензии эритроцитов (приготовленные суспензии эритроцитов с Hct от 20 до 55% в изотоническом растворе NaCl): на рисунке приведено уравнение линейной регрессии

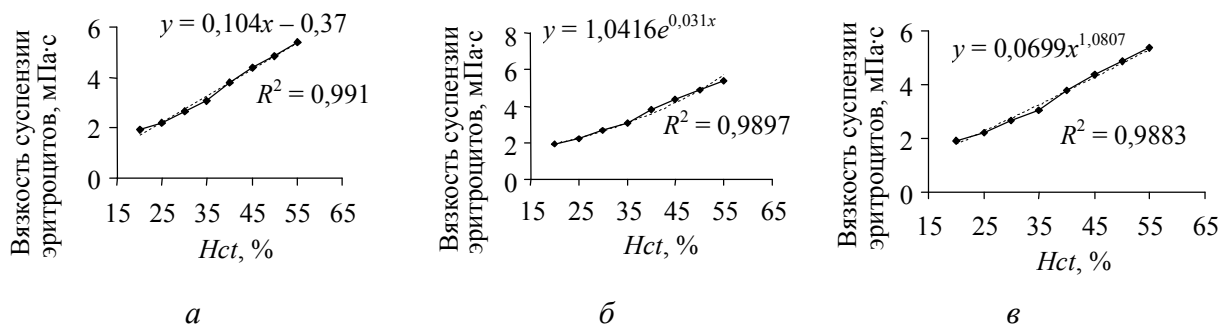


Рис. 3. Зависимость вязкости суспензии от гематокрита при высоком напряжении сдвига: а – линейная модель; б – экспоненциальная модель; в – степенная модель

При гематокрите 20% вязкость суспензии эритроцитов при высоком напряжении сдвига составила $1,90 \pm 0,03$ мПа·с, а с гематокритом 55% она стала равной $3,23 \pm 0,03$ мПа·с, что на 70% ($p < 0,01$) больше.

Если проанализировать несколько моделей взаимосвязи гематокрита и вязкости суспензий: линейную, степенную, экспоненциальную, то видно (рис. 3, а и б), что соотношение вязкости и гематокрита при высоком напряжении сдвига хорошо описывается уравнением линейной регрессии: $y = 0,104x - 0,37$, при достоверности аппроксимации экспериментальных данных 99% ($R^2 = 0,991$; рис. 3, а). Тогда как при низких скоростях сдвига эта зависимость лучше представлена экспоненциальной моделью: $y = 0,7135e^{0,0445x}$, при $R^2 = 0,997$.

Таким образом, в модельных опытах были получены данные, подтверждающие существенный вклад концентрации эритроцитов в вязкость крови, и выраженном проявлении кровью при этом, свойств неньютоновской жидкости.

Влияние вязкости плазмы разной величины на текучесть цельной крови и ее транспортный потенциал

В группе 1 с наименьшей вязкостью плазмы, равной $1,72 \pm 0,012$ мПа·с, вязкость крови при высоком и низком напряжении сдвига составила соответственно $4,06 \pm 0,13$ и $7,11 \pm 0,37$ мПа·с, при этом *Hct* был равен $43,5 \pm 0,7\%$. Во второй группе с вязкостью плазмы $1,80 \pm 0,01$ мПа·с вязкость крови практически не отличалась от данных первой группы. Тогда как в третьей и четвертой группах она была заметно выше (рис. 4).

Динамика изменений вязкости цельной крови в группах с разным уровнем вязкости плазмы хорошо описывается регрессионным уравнением: $y = 1,4643x + 1,5038$, при высокой достоверности аппроксимации данных, равной 98%.

Вычисление отношения гематокрита к вязкости крови в данных группах показало, что наибольшим транспортным потенциалом обладает кровь у лиц группы 1, разница в 11% относительно группы 4 была статистически достоверной ($p < 0,01$).

Таким образом, видно, что наилучшим транспортным потенциалом обладала кровь у лиц группы 1 с вязкостью – 4,06 мПа·с, гематокритом – 43,5% и вязкостью плазмы – 1,72 мПа·с. Кроме того, у лиц группы 1 выявлено повышение деформируемости эритроцитов на 8% ($p < 0,05$) при более низкой их агрегации (на 15%, $p < 0,05$) по сравнению с данными лиц группы 2.

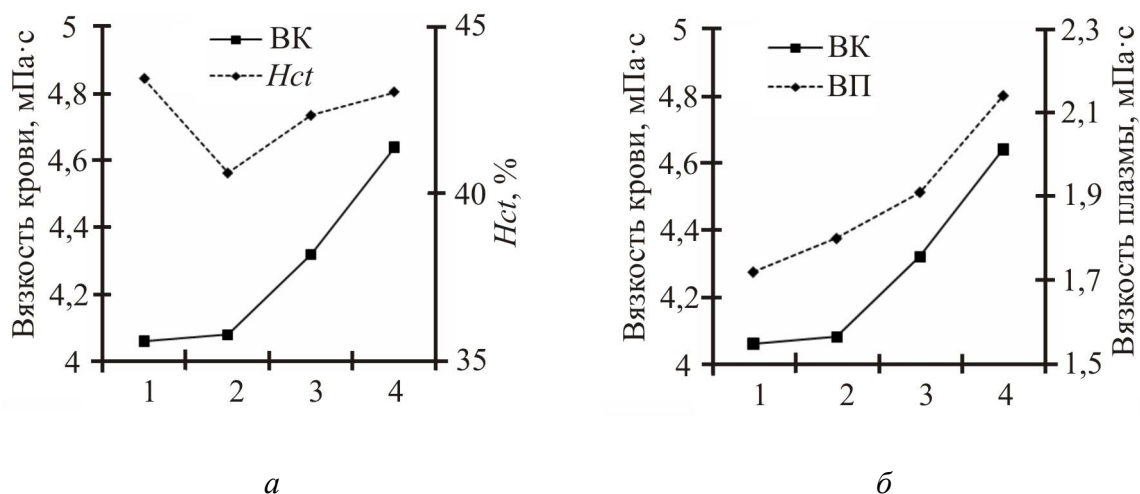


Рис. 4. Распределение в четырех группах наблюдения значений вязкости цельной крови при высоком напряжении сдвига и соответствующих величин от гематокрита (а); соответствующих значений вязкости плазмы (б)

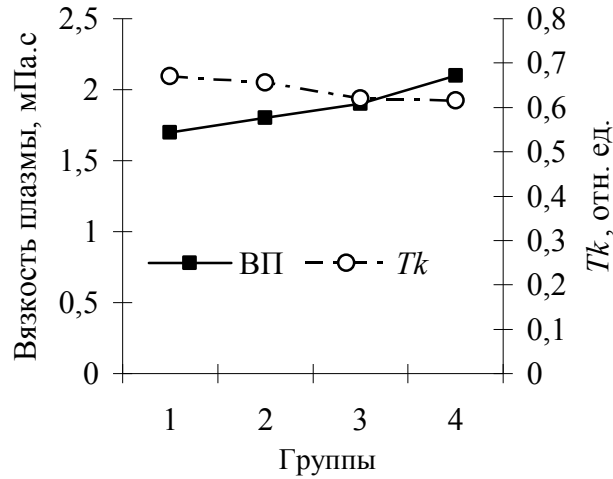


Рис. 5. Распределение в четырех группах наблюдения вязкости плазмы и индекса ригидности эритроцитов для цельной крови

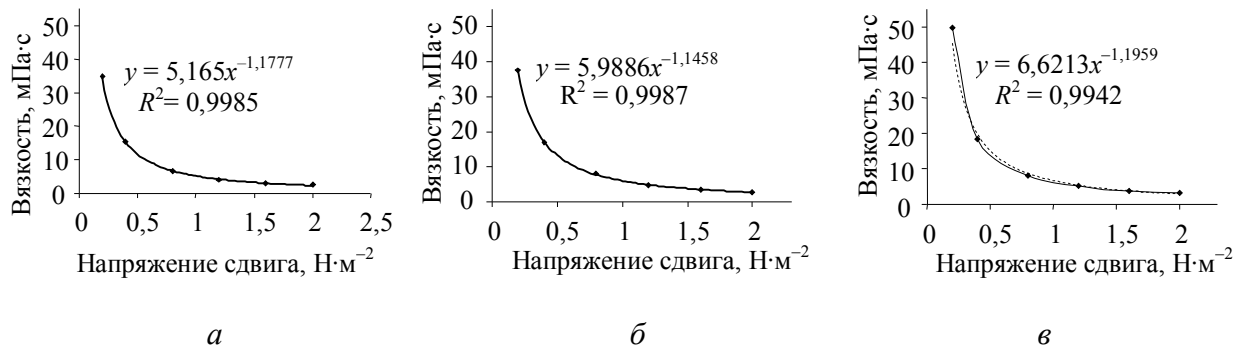


Рис. 6. Кривая течения суспензии эритроцитов с $Hct = 40\%$: а – в растворе декстрана-70 с концентрацией 1%; б – в растворе декстрана-70 с концентрацией 2%; в – в растворе декстрана-70 с концентрацией 3%

Если отобразить на одном графике (рис. 5) изменения величин вязкости плазмы и индекса ригидности эритроцитов (Tk) во всех четырех группах, то видно, что увеличение вязкости плазмы сочетается со снижением Tk .

Корреляционный анализ взаимосвязи транспортного потенциала и вязкости плазмы позволил выявить выраженную отрицательную связь ($r = -0,83$). Кроме того, результаты исследования показали, что более высокая вязкость плазмы сочетается с меньшим транспортным потенциалом цельной крови.

Для уточнения роли суспензионной среды были проведены исследования с приготовленными суспензиями эритроцитов ($Hct = 40\%$) в декстране-70 разной концентрации. Кривые течения суспензии эритроцитов в декстране с его концентрациями 1, 2 и 3% хорошо описываются степенной функцией, иллюстрируя степень неньютоновости этих суспензий (рис. 6).

Оценка микрореологического поведения эритроцитов в среде с разной вязкостью показала, что степень деформации клеток увеличивается с приростом вязкости суспензионной среды (рис. 7). Разница ИУЭ в изотоническом растворе и в среде, содержащей 3% декстрана 70, составила 11% ($p < 0,01$). Из уравнения регрессии $y = 0,008x + 0,209$ видно, что при увеличении вязкости суспензионной среды на единицу, прогнозируется прирост ИУЭ на 0,008 при достоверности аппроксимации данных этим регрессионным уравнением, равным 95%.

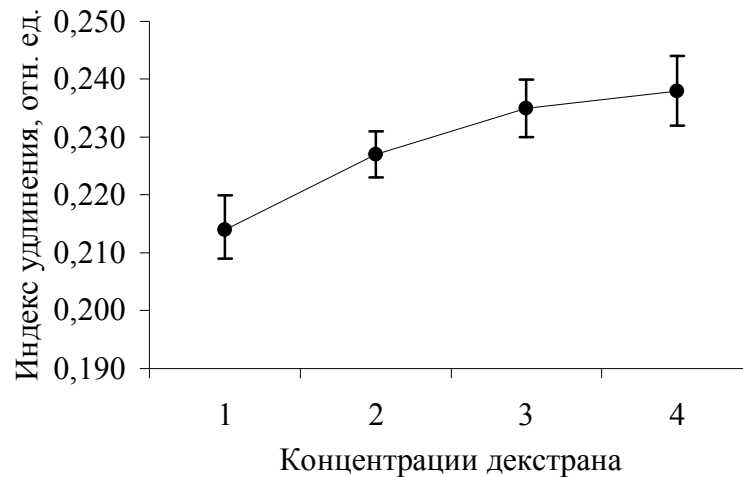


Рис. 7. Сравнение индекса удлинения эритроцитов (ИУЭ) в растворе декстрана 70 разной концентрации: 1 – в изотоническом растворе без декстрана; 2 – декстран 1%; 3 – декстран 2%; 4 – декстран 3%

Таким образом, изменение индекса удлинения эритроцитов в суспензиях с разной величиной вязкости среды свидетельствует о большей способности к деформации у эритроцитов, находящихся в более вязком окружении. ИУЭ в физиологическом растворе ($\eta = 1,04$ мПа·с) составлял 0,214 отн. ед. Увеличение вязкости среды на 24% до вязкости 1,36 мПа·с привело к увеличению индекса деформации до 0,227 отн. ед. Полученную зависимость можно описать степенной функцией вида: $y = 0,2144x^{0,1586}$ при достоверности аппроксимации данных $R^2 = 0,9325$ или полиномиальной функцией вида $y = -0,0274x + 0,1086x + 0,1305$ при $R^2 = 0,999$.

Оценка транспортного потенциала исследуемых суспензий эритроцитов с $Hct = 40\%$ показала, что наибольшее значение отношение Hct / VK , равное 8,23 отн. ед., было зарегистрировано в суспензии эритроцитов на основе 1%-го раствора декстрана. Тогда как его наименьшая величина сочеталась с самой высокой вязкостью суспензий с декстраном 70, равной 6,4 мПа·с.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что между гематокритом и вязкостью крови существует выраженная связь [1, 4, 22, 23]. В данном исследовании коэффициент корреляции между вязкостью крови и Hct не превышал 0,66 ($p < 0,05$). Вместе с тем, роль концентрации эритроцитов оказывается очень существенной, если исключить другие факторы. Так, в модельных опытах с суспензиями эритроцитов при отсутствии агрегации эритроцитов и при постоянной вязкости среды [3, 10] была получена зависимость гематокрит–вязкость, близкая к линейной. Кривая течения в данном случае описывалась уравнением линейной регрессии: $y = 0,104x - 0,37$. Тогда как в цельной крови отношения *гематокрит-вязкость* с большей достоверностью описывались экспоненциальной функцией: $y = 1,7018e^{0,022x}$, $R^2 = 0,940$. С другой стороны, следует заметить, что в модельных опытах зависимость вязкости от гематокрита при низком напряжении сдвига также лучше описывается экспоненциальной моделью: $y = 0,7135e^{0,0445x}$, $R^2 = 0,990$, а не линейной, как при высоком напряжении сдвига. Таким образом, по всей видимости, при низких напряжениях сдвига на вязкость суспензии эритроцитов влияют микрореологические факторы [17].

Известно, что при низком гематокрите [21], как, например, при серповидноклеточной анемии вязкость крови заметно снижена и ее величины недостаточно для создания необходимого напряжения сдвига и поддержания функциональной плотности капилляров ткани, перфузируемой такой кровью [11]. В этой связи в литературе обсуждается вопрос об оптимальном гематокрите, при котором транспорт кислорода будет эффективным. Авторами были получены данные, свидетельствующие о том, что в условиях нарастающего гематокрита эффективность доставки кислорода сначала повышается и достигает максимума при $Hct - 40-44\%$, а затем заметно снижается. Имеются данные о том, что максимальное потребление кислорода отрицательно коррелирует с гематокритом [1, 12]. Следовательно, его прирост увеличивает транспорт кислорода до тех пор, пока гемоконцентрация не повлечет за собой выраженное повышение вязкости крови и, следовательно, прирост сопротивления кровотоку [6]. Однако небольшое повышение гематокрита может быть полезным не только для оптимизации кислородтранспортной функции крови, а также потому что возникающий при этом умеренный прирост вязкости крови и напряжения сдвига на стенке сосуда, запускают процесс выделения NO эндотелием. Это последовательность событий обеспечивает регуляторную вазодилатацию [24].

Важно заметить, что коэффициенты корреляции между гематокритом и транспортным потенциалом как в модельных опытах, так и при анализе текучести цельной крови, были отрицательными и составляли $-0,640$ ($p < 0,01$) и $-0,452$ ($p < 0,01$), соответственно.

Другим важным для рассмотрения фактором, определяющим реологические свойства крови и её текучесть в целом, является *вязкость плазмы*. Плазма это та среда, в которой клетки крови находятся как в системе макро-, так и микроциркуляции [9, 19, 20, 21]. Если специально разделить всех обследованных лиц по величине вязкости плазмы на четыре подгруппы (как было сделано в данных опытах), то по мере увеличения вязкости плазмы наблюдается, близкий к линейному, прирост вязкости крови, как при высоких, так и при низких напряжениях сдвига. В данных условиях изменение вязкости цельной крови в группах с разным уровнем вязкости плазмы хорошо описывалось регрессионным уравнением: $y = 1,4643x + 1,5038$, при высокой достоверности аппроксимации экспериментальных данных этой моделью (98%).

Возрастание вязкости плазмы сочеталось с увеличением деформации эритроцитов. Это может обеспечивать клеткам эффективный пассаж через капилляры [6, 18]. Коэффициент корреляции между вязкостью плазмы и индексом ригидности был достаточно высоким $r = 0,740$. Это позволяет сделать заключение о существенном влиянии вязкости плазмы на деформацию эритроцитов. Действительно, более вязкая среда, следовательно, и более плотная – способна эффективнее передавать напряжение сдвига на эритроциты и поэтому они оказываются деформированными в большей степени [15, 18]. На это указывают данные исследования индекса удлинения эритроцитов. Он увеличивался с возрастанием вязкости среды. Общий прирост этого индекса составил 10% ($p < 0,05$). Расчет индекса ригидности эритроцитов (Tk) также подтвердил то, что с нарастанием вязкости среды происходит увеличение деформации эритроцитов. Это можно расценивать как результат действия внешних деформирующих факторов [17, 18]. Важно иметь в виду, что конечный эффект деформации зависит от баланса внешних и внутренних деформирующих факторов [7, 25]. При этом к внешним относятся: приложенное к клеткам напряжение сдвига, вязкость среды и гематокрит [10, 18].

Анализ влияния вязкости плазмы на транспортный потенциал выявил наличие значимой отрицательной корреляции между этими двумя показателями ($r = -0,57$; $p < 0,05$). И подтверждением этому служит наличие отрицательной зависимости между текучестью цельной крови и вязкостью плазмы

Таким образом, комплексное исследование текучести крови позволило установить относительный вклад основных реологических факторов, таких как гематокрит, вязкость плазмы, деформируемость и агрегация эритроцитов в текучесть цельной крови. При этом уточнены величины реологических характеристик, при которых транспортные возможности крови были наиболее значимыми. Кривые течения крови и суспензии эритроцитов удовлетворительно описываются моделями жидкости с характерным неньютоновским поведением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-04-00550-а и в рамках реализации федеральной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы на 2009–2013 гг.».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галенок В.А., Гостинская Е.В., Диккер В.Е. Гемореология при нарушениях углеводного обмена. – Новосибирск: Наука, 1987. – 258 с.
2. Джонсон П. Периферическое кровообращение. – М.: Медицина, 1982. – 440 с.
3. Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У. Механика кровообращения. – М.: Мир, 1981. – 623 с.
4. Левтов В.А., Регирер С.А., Шадрин Н.Х. Реология крови – М.: Медицина, 1982. – 272 с.
5. Муравьев А.В., Тихомирова И.А., Борисов Д.В. Анализ влияния плазменных и клеточных факторов на агрегацию эритроцитов разных возрастных популяций // Физиология человека. – 2002. – № 4. – С. 144–148.
6. Муравьев А.В. Чепоров С.В. Гемореология (экспериментальные и клинические аспекты реологии крови). – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2009. – 178 с.
7. Муравьев А.В., Тихомирова И.А., Михайлов П.В., Маймистова А.А., Муравьев А.А. Роль микрореологических свойств эритроцитов в неньютоновском поведении цельной крови // Российский журнал биомеханики. – 2010. – Т. 14, № 4 (50). – С. 96–104.
8. Селезнев С.А., Назаренко Г.И., Зайцев В.С. Клинические аспекты микрогемодиализации. – М.: Медицина, 1985. – 179 с.
9. Ajmani R.S. Hypertension and hemorheology // Clin. Hemorheol. Microcirc. – 1997. – Vol. 17, No. 6. – P. 397–420.
10. Baskurt O.K., Meiselman H.J. Blood rheology and hemodynamics // Semin. Thromb. Hemost. – 2003. – Vol. 29. – P. 435–450.
11. Bowers A.S., Pepple D.J., Reid H.L. Oxygen delivery index in subjects with normal haemoglobin (HbAA), sickle cell trait (HbAS) and homozygous sickle cell disease // Clin. Hemorheol. and Microcirc. – 2008. – Vol. 40, No. 4. – P. 303–309.
12. Brun J.F., Micallel J.F., Supparo I., Rama D., Benezis C., Orsetti A. Maximal oxygen uptake and lactate thresholds during exercise are related to blood viscosity and erythrocyte aggregation in professional football players // Clin. Hemorheol. – 1995. – Vol. 15. – P. 201–212.
13. Chien S., Lung L. Physicochemical basis and clinical implications of red cell aggregation // Clin. Hemorheol. – 1987. – Vol. 7. – P. 71–91.
14. Dintenfass L. Clinical applications of hemorheology // The rheology of blood, blood vessels and associated tissues. – New York: Oxford Press, 1981. – P. 22–50.
15. Dormandy J. A. Haemorheological aspects of thrombosis // Br. J. Haematol. – 1980. – Vol. 45, No. 4. – P. 519–522.
16. Driessen G., Heidtman H., Schmid-Schönbein H. Reaction of erythrocyte velocity in capillaries upon reduction of hematocrit value // Bioreology. – 1979. – Vol. 16. – P. 125–126.
17. Kon K., Maeda N., Shiga T. The relationship between deoxygenation rate erythrocytes and deformation by shear stress // Biorheology. – 1983. – Vol. 20. – P. 92–100.
18. Kon K., Maeda N., Shiga T. Erythrocyte deformation in shear flow: influences of internal viscosity, membrane stiffness, and hematocrit // Blood. – 1987. – Vol. 69. – P. 727–734.
19. London M. The role of blood rheology in regulating blood pressure // Clin. Hemorheol. and Microcirc. – 1997. – Vol. 17. – P. 93–106.
20. Lowe G.D., Barbenel J.C. Plasma and blood viscosity // Clinical Blood Rheology / ed. G.D.O. Lowe. – Boca Raton: CRC Press, 1988. – Vol. 1. – P. 11–44.
21. Martini J., Carpentier B., Chávez Negrete A., Cabrales P., Tsai A.G., Intaglietta M. Beneficial effects due to increasing blood and plasma viscosity // Clin. Hemorheol. and Microcirc. – 2006. – Vol. 35, No. 1–2. – P. 51–57.

22. Merrill E.W., Pelletier G.A., Cheng C.S. Yield stress of normal human blood as a function of the endogenous fibrinogen // J. Appl. Physiol. – 1968. – Vol. 26. – P. 1–3.
23. Rebel A., Ulatowski J.A., Kwansa H., Bucci E., Koehler R.C. Cerebrovascular response to decreased hematocrit: effect of cell-free hemoglobin, plasma viscosity, and CO₂ // Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. – 2003. – Vol. 285. – H1600–H1608.
24. Salazar Vázquez B.Y., Martini J., Chávez Negrete A., Cabrales P., Tsai A.G., Intaglietta M. Microvascular benefits of increasing plasma viscosity and maintaining blood viscosity: counterintuitive experimental findings // Biorheology. – 2009. – Vol. 46, No. 3. –P. 167–179.
25. Stoltz J.F., Donner M., Muller S., Larcen A. Hemorheology in clinical practice. Introduction to the notion of hemorheologic profile // J. Mal. Vasc. – 1991. – Vol. 6. – P. 261–270.

THE STUDY OF THE ROLE OF INDIVIDUAL BLOOD CHARACTERISTICS IN ITS FLUIDITY ALTERATION AND TRANSPORT EFFICIENCY

**A.V. Muravyov, I.A. Tikhomirova, S.V. Bulaeva, V.A. Vdovin, A.A. Muravyov
(Yaroslavl, Russia)**

It has been studied the effect of the various red blood cell (RBC) concentration (from 20 to 55%) of the whole blood and RBC suspensions on the blood fluidity. It was obtained the equations that describe quite properly the effect of hematocrit changes on the blood fluidity and demonstrate the degree of blood non-Newtonian properties under these conditions. These non-Newtonian properties were approximated satisfactory by the model of the power law both under the low (20%) and high (55%) hematocrit. It was found that plasma viscosity contribution to the whole blood viscosity was less than hematocrit one (Hct = 43%) and it made up 27%. The obtained rheological data showed that the best blood transport potential was under following conditions: lower whole blood viscosity, the moderate value of Hct (43.5%), lower plasma viscosity (1.72 mPa·c) and also a sufficient red cell deformability. Using dextran solutions (dextran 70, 1%, 2% and 3%) for modelling of the various viscosities of the suspension medium were confirmed that the best transport efficiency had red cell suspension with lower viscosity. It has been shown that the red cell suspension flow with low, middle and higher viscosity was described quite well by equation of the fluid power law with relative higher reliability of the experimental data approximation (99%). It was found that with the suspension medium viscosity augmentation resulted in an increase of red cell deformability. Taken together obtained data clearly showed the role of hematocrit, plasma viscosity and red cell deformability in whole blood fluidity changes and blood transport efficiency.

Key words: blood, suspension, rheological properties, hematocrit, plasma viscosity, red cell deformability, transport potential, non-Newtonian properties, equations of flow.

Получено 28 июля 2012