

УДК 532.135

DOI: 10.17223/00213411/62/12/55

*В.П. ДЕМКИН<sup>1</sup>, С.В. МЕЛЬНИЧУК<sup>1</sup>, В.В. УДУТ<sup>1,2</sup>, И.И. ТЮТРИН<sup>3</sup>, Т.В. РУДЕНКО<sup>1</sup>, Д.Б. КРИНИЦЫНА<sup>1</sup>***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕЛЬНОЙ КРОВИ  
НА ОСНОВЕ МЕТОДА НИЗКОЧАСТОТНОЙ ПЬЕЗОТРОМБОЭЛАСТОГРАФИИ \***

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование вязкоупругих свойств цельной крови при осциллирующих сдвиговых напряжениях. На основе ультразвуковой эластографии разработана математическая модель и метод вычисления комплексного коэффициента вязкости цельной крови в процессе ее коагуляции. Проведены расчеты комплексного показателя вязкости цельной крови и его реальной и мнимой частей. Вычисленный коэффициент вязкости крови в начале процесса ее свертывания хорошо согласуется с данными реометрических измерений. Полученные результаты подтверждают возможность использовать данный подход к определению вязкоупругих свойств цельной крови и анализу их динамики в процессе её коагуляции в режиме, максимально приближенном к *in vivo* исследованию.

**Ключевые слова:** реология, неньютоновская жидкость, коагуляция цельной крови, динамика вязкости крови.

**Введение**

На сегодняшний день достигнуты значительные успехи в развитии теоретических методов и экспериментальных средств для изучения гемореологии цельной крови и глубокого понимания взаимодействия компонент крови, определяющих ее вязкоупругие свойства [1–4]. Вместе с тем проблема определения вязкоупругих свойств цельной крови и их изменения в процессе свертывания остается открытой по причине отсутствия инструментов диагностики. В существующих устройствах определения реологии цельной крови исследования проводятся на её стабилизированных образцах (капиллярные и ротационные реометры), а при оценке упругих свойств используются тромбоэластографы, оценивающие изменения этой характеристики уже после образования сгустка [5].

Цельная кровь обладает двумя основными реологическими свойствами – вязкостью и пластичностью [6] – и относится к классу неньютоновских жидкостей. Основным реологическим уравнением для таких жидкостей является  $\tau = \eta \dot{\gamma}$ , где  $\tau$  – напряжение сдвига;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвиговой деформации;  $\eta$  – коэффициент вязкости. Для цельной крови так называемая кажущаяся (apparent) вязкость  $\eta(\dot{\gamma})$  является нелинейной функцией от  $\dot{\gamma}$  и зависит от ряда факторов: концентрации форменных элементов крови и их агрегационных показателей, состава плазмы и ее пространственного распределения, кинетических характеристик кровотока, скорости упругих деформаций сдвига, внешних факторов, причем различные факторы могут оказывать взаимное влияние на их величину. Кровь является многофазной и гетерогенной дисперсной системой и относится к нелинейным вязкопластичным средам [7, 8].

Основной вклад в упругие свойства крови вносит агрегационная способность эритроцитов. При низких скоростях деформации сдвига  $\dot{\gamma}$  созданная эритроцитами пространственная структура не разрушается и формирует пороговое поведение сдвиговой деформации, при которой проявляются пластические свойства крови. При высоких скоростях ( $\dot{\gamma} > 200 \text{ с}^{-1}$ ) происходит разрушение пространственной структуры эритроцитов, что вызывает эффект сдвигового разжижения (shear thinning) крови, приводящий к уменьшению вязкости. В таком состоянии кровь ведет себя как ньютоновская жидкость [3, 4, 9].

В классической вискозиметрии определение вязкоупругих свойств крови основано на измерении зависимости  $\tau(\dot{\gamma})$ , а также пороговых значений  $\tau$  и  $\dot{\gamma}$  [10, 11]. Для учета упругих свойств крови используется метод комплексного представления модуля сдвига  $G = G' + iG''$ , где  $G'$ ,  $G''$  – модуль упругости (storage modulus) и модуль вязкости (loss modulus) соответственно [11, 12]. Ана-

\* Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>