

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ КРОВИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Инсарова Н.И.¹, Лешенко В.Г.¹, Мансуров В.А.¹, Мансуров Д.В.²,
Шеламова М.А.¹

¹ *Белорусский государственный медицинский университет,
Минск, Беларусь*

² *Научно-производственное частное унитарное предприятие «Фарнелл»,
Минск, Беларусь, mansurov@tut.by*

Маловязкие концентрированные суспензии, такие как цельная кровь, обладают сложным реологическим поведением, несущем ценную информацию о взаимодействии частиц суспензии (эритроцитов) и изменении их формы. При небольших скоростях сдвига $\dot{\gamma} \sim 1 \text{ с}^{-1}$ вязкость крови зависит от агрегируемости эритроцитов, а при $\dot{\gamma} > 100 \text{ с}^{-1}$ – от их деформируемости [1].

Структура многих концентрированных суспензий не может быть охарактеризована только их микроструктурой: микрокомпоненты образуют макроструктуры. Гидродинамический размер этих групп зависит от приложенного напряжения сдвига, которое разрушает структурные единицы, приводя к зависимости вязкости суспензии от $\dot{\gamma}$. Эти соображения приводят к концепции структуры, зависящей от $\dot{\gamma}$, проявляющейся как псевдопластичность при реологических измерениях. На основании изу-

чения структурной кинетики и неньютоновского поведения суспензий Квемада [2] удалось получить реологическую модель, описывающую вязкость суспензии η как функцию приведенной скорости сдвига Γ :

$$\eta = \eta_{\infty} \left[(1 + \Gamma^p) / (\chi + \Gamma^p) \right]^p \quad (1)$$

здесь η_{∞} - вязкость при $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$, структурным параметром χ является

$$\chi(\phi) = (1 - \phi/\phi_0) / (1 - \phi/\phi_{\infty}) = \sqrt{\eta_{\infty}/\eta_0} \quad (2)$$

Здесь ϕ_0 - предельно максимальная упаковка структурных единиц при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$, ϕ_{∞} - предельно максимальная упаковка структурных единиц при $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$. Приведенная скорость в этом случае выражается как $\Gamma \equiv t_c \cdot \dot{\gamma}$, характерное время разрушения структуры - $t_c = \eta_{\text{eff}} r^3 / w$, здесь под эффективной вязкостью η_{eff} понимается динамическая вязкость суспензии, а под w энергия взаимодействия частиц дисперсии. Значение показателя $p \approx 0.5$ [2].

Точное измерение реологических свойств жидкостей основано на применении простых сдвиговых течений. Постулируется, что такое течение имеет ламинарный характер для установившегося режима течения, т.е. $(\mathbf{u}\nabla) \cdot \mathbf{u} = 0$. Однако более информативным является нестационарное течение. Обычно степень нестационарности течения характеризуется числом Струхала $Sh = L/v \cdot t$. В случае $Sh < 1$ (квазистационарное течение) зависимость гидродинамических характеристик от времени является параметрической [3,4].

Основной задачей настоящей работы является обоснование нестационарного метода измерения реологических параметров дисперсных систем посредством численного моделирования следующих характеристик течения: времени выхода на установившийся режим течения, длины начального участка, числа Sh на входе в капилляр. Рассматривается неустановившееся течение несжимаемой неньютоновской жидкости, текущей из среды неограниченного объема в капилляр длиной l и радиуса r_c при скачкообразном перепаде давления $P \sim 100$ Па.

Реологическое поведение среды описывается реологической моделью (1) с $p = 0.5$ и различными значениями структурного параметра (2). Первоначальные значения параметров модели (1) получены методом фитинга реальной кривой течения крови, взятой у здорового донора ($\eta_{\infty} = 3,1$ мПа·с; $\chi = 0,2$; $t_c = 0,26$ с) при нормальном показателе гематокрита $H_{cr} = 0,4$ [5]. Средняя скорость установившегося течения в капилляре с $r_c = 1$ мм составила около 0,25 м/с, та же величина для $r_c = 0,2$ мм

- 0,0155 м/с. Длина L_0 составила 8,1 мм и 1,1 мм соответственно, а для $r_c = 1$ мм $Sh \sim 0,6$ (нестационарное течение), для $r_c = 0,2$ мм $Sh \sim 0,04$ (квазистационарное течение). Результаты моделирования показаны в таблице.

В результате анализа данных получено, что радиус капилляра, соответствующий условиям квазистационарного течения при давлении, должен быть меньше, чем 0,5 мм. Только в этом случае можно полагать, что зависимость гидродинамических характеристик от времени является параметрической. Влияние структурного параметра χ на характеристики течения и, следовательно, на Sh незначительно.

В заключении укажем на то, что влияние структурного параметра χ дисперсной системы при наличии внутренней микро- и макроструктуры дисперсии на время выхода на режим квазистационарного течения незначительное. В основном это время зависит от радиуса капилляра, увеличивается с увеличением радиуса пропорционально $\ln(r_c)$.

Таблица - Зависимость параметров течения от радиуса капилляра

r_c , мм	\bar{u} , м/с при $\chi = 0,01$	\bar{u} , м/с при $\chi = 1$	L_0 , мм	τ , мс	Sh при $\chi = 0,01$
0,2	0,0155	0,016	-	26	~ 0
0,5	0,099	0,101	1,1	34	0,33
1	0,25	0,403	8,1	59	0,55

На примере моделирования нестационарного течения цельной крови, полученной от здоровых доноров, показано, что границей применимости гипотезы квазистационарного течения является радиус капилляра, меньшего, чем 0,5 мм.

Работа выполнена благодаря финансовой поддержке БРФФИ, проект Б10-072.

Литература

1. Левтов В.А., Регирер С.А., Шадрин Н.Х. Реология крови. М. Медицина, 1982. 270 с.
2. D. Quemada Rheological modelling of complex fluids. I. The concept of effective volume fraction revisited // Eur. Phys. J. AP. - 1998 Vol. 1, P. 119-127.
3. Yeow, Y.L., Nguyen, Y.T., Vu, T.D., Wong, H.K. Processing the capillary viscometry data of fluids with yield stresses. // Rheologica Acta 2000. Vol. 39, P. 392-398.