

порядков выше, чем скорость диффузионного перемещения тромболитических лекарств, оцененной в [2] как 0.8 мкм/с. Данные результаты подтверждают эффективность метода интенсификации транспорта лекарств в тромбированных сосудах с применением магнитной жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изученная модель создания циркуляционных течений в канале с немагнитной жидкостью

оправдано использование линейного приближения (2) для описания течения жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-72-01012).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Для расчета компонент амплитуды $\vec{H}_{01}$ поля в формуле (1), создаваемого соленоидом 1 на рис. 1 применяется закон Био—Савара—Лапласа. В цилиндрических координатах он записывается так

$$H_{01x}(x, z) = \frac{I \cdot D \cdot N}{8\pi h} \int_{-(h+a)}^{-a} dz' \left(\int_0^{2\pi} \frac{(z - z') \cos \varphi}{\left[(z - z')^2 + \left(\frac{D}{2} \sin \varphi \right)^2 + \left(x - x_0 - \frac{D}{2} \cos \varphi \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} d\varphi \right)$$

$$H_{01z}(x, z) = \frac{I \cdot D \cdot N}{8\pi h} \int_{-(h+a)}^{-a} dz' \left(\int_0^{2\pi} \frac{\frac{D}{2} - (x - x_0) \cos \varphi}{\left[(z - z')^2 + \left(\frac{D}{2} \sin \varphi \right)^2 + \left(x - x_0 - \frac{D}{2} \cos \varphi \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} d\varphi \right)$$

и с внедренным в нее облаком нанодисперсной магнитной жидкости при воздействии неоднородного вращающегося магнитного поля, созданного двумя соленоидами. Правый конец канала предполагался непроницаемым (тромбированным). Результаты показывают, что при такой конфигурации соленоидов, частоты и напряженности магнитного поля, а также при достаточно реалистических параметрах задачи, в канале около тромба генерируются циркуляционные течения с амплитудой скорости около 0.09 мкм/с. Такие потоки могут значительно усилить транспорт нейтральной молекулярной примеси (тромболитического лекарства) в несущей среде сосуда, что подтверждает теорию, предложенную в работах [1,2] о перспективности метода создания магнитоиндуцированных циркуляций в закупоренных кровеносных сосудах для ускорения транспорта лекарства.

Теперь обсудим возможность применения подхода малых чисел Рейнольдса и соответствующего ему уравнения (2). На рис. 2 видно, что скорость течения жидкости не превышает нескольких сотен микрометров в секунду. При таких скоростях, для канала диаметром около 1—2 мм, что соответствует диаметру кровеносного сосуда (тромбирование которого опасно для здоровья и жизни человека), и с использованием вязкости воды, число Рейнольдса оказывается много меньше единицы. Исходя из этого,

где I — ток в электромагните, h — его высота, — количество витков электромагнита, а расстояние от электромагнита до канала. Эта соотношение дает компоненты поля для нижнего электромагнита, для верхнего электромагнита данные компоненты записываются аналогично.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Creighton Francis M.* Magnetic-based systems for treating occluded vessels. US Patent No. 8308628. 2012.
2. *Clements M.J.* A mathematical model for magnetically-assisted delivery of thrombolytics in occluded blood vessels for ischemic stroke treatment. PhD thesis. Texas University, 2016.
3. *Долуденко И.М., Хайретдинова Д.Р., Загорский Д.Л. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 3. С. 321; *Doludenko I.M., Khairatdinova D.R., Zagorsky D.L. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 3. P. 277.
4. *Тятюшкин А.Н.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 7. С. 885; *Tyatyushkin A.N.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 7. P. 804.
5. *Ряполов П.А., Соколов Е.А., Шельдешова Е.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 3. С. 343;