

необходимо убедиться в справедливости условия $\beta_V > \beta_{V^*}$ ($A < A^*$). Для магнитогидродинамических пограничных слоев подобного ограничения нет. Использование диапазона $A \gg 1$ при выводе основных расчетных формул в данной работе продиктовано логическими особенностями метода [9], с помощью которого получены результаты при всех $A \geq 0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стулов В. П. Об уравнениях ламинарного пограничного слоя в двухфазной среде // Изв. АН СССР. МЖГ. 1979. № 1. С. 51–60.
2. Осипцов А. Н. Пограничный слой на затупленном теле в потоке запыленного газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1985. № 5. С. 99–107.
3. Агранат В. М. Влияние градиента давления на трение и теплообмен в запыленном пограничном слое // Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. № 5. С. 105–108.
4. Волощук В. М. Введение в гидродинамику грубодисперсных аэрозолей. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 208 с.
5. Левин Л. М. Об осаждении частиц из потоков аэрозоля на препятствия // Докл. АН СССР. 1953. Т. 91. № 6. С. 1329–1332.
6. Sparrow E. M., Eckert E. R. G., Minkowycz W. J. Transpiration cooling in a magnetohydrodynamic stagnation-point flow // Appl. Sci. Res. Section. A. 1962. V. 11. № 1. P. 125–147.
7. Резников Б. И., Смыслов Ю. Н. Об одном методе определения трения и теплового потока в автомобильных задачах пограничного слоя // ПМТФ. 1964. № 1. С. 53–58.
8. Meksyn D. New methods in laminar boundary layer theory. Oxford: Pergamon Press, 1961. 294 p.
9. Дильман В. В., Полянин А. Д. Методы модельных уравнений и аналогий в химической технологии. М.: Химия, 1988. 303 с.

Томск

Поступила в редакцию
2.XI.1989

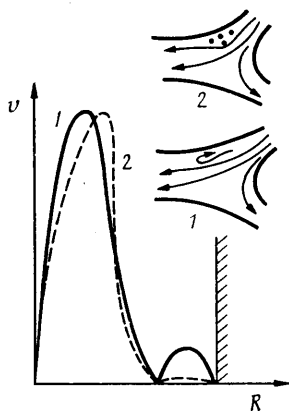
УДК 532.54;612.13

© 1990 г.

М. В. КАМЕНЕВА, М. С. ПОЛЯКОВА, Е. В. ФЕДОСЕЕВА

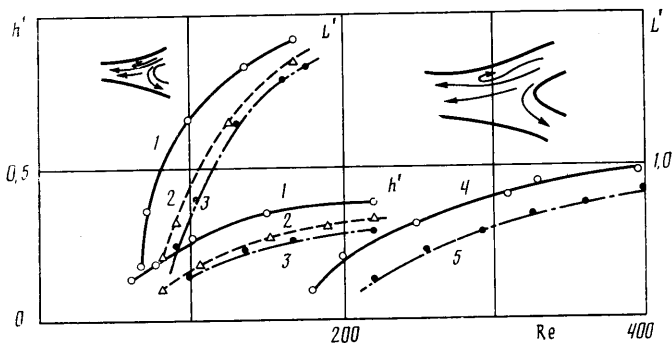
ВЛИЯНИЕ СНИЖАЮЩИХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРОВ НА СТРУКТУРУ ЗАСТОЙНЫХ ЗОН И ВИХРЕЙ В МОДЕЛЯХ СТЕНОЗИРОВАННЫХ И РАЗВЕТВЛЯЮЩИХСЯ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ

Гидродинамическое сопротивление кровеносной системы определяется ее геометрией и реологическими свойствами крови. Существенный вклад в величину полного гидродинамического сопротивления сосудистой сети вносят застойные зоны и возмущения потока крови (возвратные и вторичные течения), возникающие на бифуркациях, а также в местах изгибов, сужений и расширений сосудов. Наличие застойных зон и локальных возмущений может играть отрицательную роль в функционировании сердечно-сосудистой системы, в частности, в связи с тем, что эти области являются местами повышенного риска развития атеросклероза [1–4].

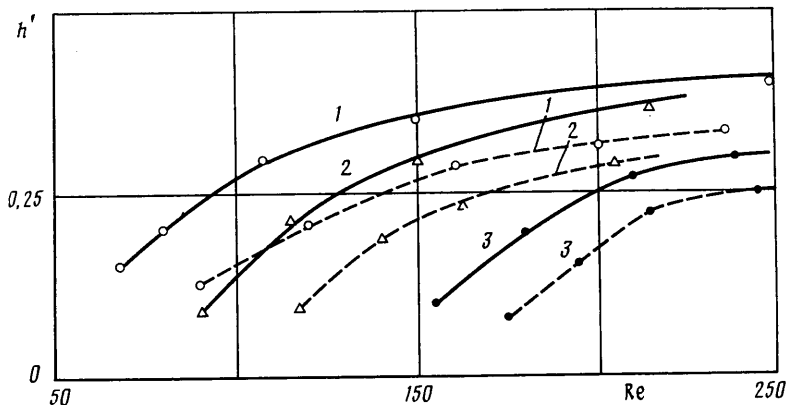


Фиг. 1

возвратные и вторичные течения, возникающие на бифуркациях, за стенозами кровеносной сети, а также на псевдотурбулентность, порождаемую неупорядоченным



Фиг. 2



Фиг. 3

движением эритроцитов на фоне среднего значения, и ламинаризируют поток крови в сосудистой сети.

Прямые измерения особенностей кровотока в сосудистой сети затруднены из-за недоступности сосудов, а там, где это возможно, из-за непрозрачности крови, связанной с высокой концентрацией форменных элементов в ней, поэтому интерес представляют модельные эксперименты. Первые эксперименты авторов, в которых исследовано влияние полимеров на размеры вихрей после стеноза, изложены в [9]. В настоящей работе исследовалась структура застойных зон и возвратных течений, образующихся в области бифуркации при различных соотношениях расходов по ветвям, а также влияние на них малых добавок полимера. Кроме того, проверена высказанная в [9] гипотеза о том, что аналогично установленной Томсом зависимости эффекта снижения сопротивления при течении полимерных растворов в трубке от диаметра трубки степень влияния полимера на возникновение возмущений за местным сопротивлением в ламинарном потоке при изменении масштаба течения будет меняться.

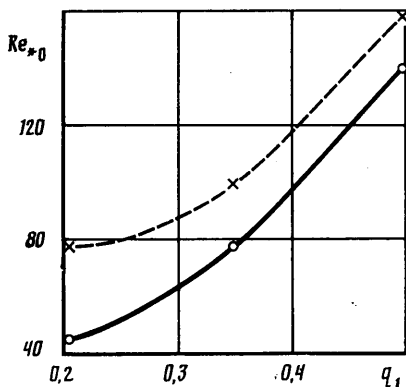
В экспериментах с помощью двухлучевой дифференциальной схемы автоматизированного доплеровского анемометра [10] измерялось распределение скорости течения по сечению трубки с разветвлениями. Измерения проводились в двух геометрически подобных трубках с отношением характерных размеров 1:4. Исследовалось влияние полимера полиэтиленоксида WSR-301 на стационарное течение в трубке при числе Рейнольдса $Re = vd/\nu$ от 1 до 800 (v — средняя скорость потока, d — характерный размер, например диаметр трубки, ν — кинематическая вязкость жидкости). Характерные для артериальной сети живых организмов значения числа Рейнольдса включают в себя исследованный диапазон.

Различные режимы течения создавались путем изменения перепада давления на концах системы. При малых числах Re наблюдается ламинарное течение. С увеличением Re в области ветвления образовывалась застойная зона, т. е. область, в которой скорость течения потока мала. При дальнейшем увеличении числа Re застойная зона превращалась в «вихревую», т. е. в части трубки, где при меньших числах Рейнольдса наблюдалась застойная зона, образовывался вихрь, размеры которого росли с ростом числа Re . Длина и ширина вихря определялись по профилю скорости, который измерялся в различных поперечных сечениях трубки.

На фиг. 1 показан характерный профиль скорости в сечении трубки, пересекающем вихрь (сплошная кривая 1). Маленький пик на профиле соответствует

рицательным скоростям движения. Размер вихря в приведенном сечении определяется шириной малого пика на профиле скорости. Штриховая кривая 2 иллюстрирует профиль скорости в области застойной зоны. Профили скорости выше и существенно ниже по потоку от местного сопротивления имели форму квадратичной параболы (параболичность проверялась по экспериментальным данным на ЭВМ с помощью метода наименьших квадратов), поэтому расход Q_0 определялся по значению скорости v_{\max} на оси невозмущенного потока перед разветвлением трубки ($Q_0 = 0,5 \pi r^2 v_{\max}$, r — радиус трубки), а расходы Q_1 и Q_2 — по скоростям на оси потока ниже разветвления (там, где профиль опять становился параболическим).

На фиг. 2 приведены полученные в экспериментах зависимости относительных размеров: длины $L' = L/d$ и ширины $h' = h/d$ вихря в области бифуркации от числа Re для воды (1) и для растворов полимера с концентрациями 10^{-6} (2) и 10^{-5} г/мл (3). Диаметр d всех трех трубок одинаков и равен 3 мм. Соотношение расходов в ветвях регулировалось путем введения на конце одной из ветвей дополнительного сопротивления в виде капилляра. Отношение расхода в дочерней ветви Q_1



Фиг. 4

к полному расходу Q_0 равно 0,25. Эти результаты свидетельствуют о том, что зарождение вихря за бифуркацией, так же как и за стенозом [9], при течении полимерного раствора происходит при больших значениях числа Re , чем при течении воды, т. е. присутствие полимерных молекул в жидкости затягивает состояние течения без вихря за местным сопротивлением в область больших чисел Рейнольдса. Эффект тем больше, чем выше концентрация полимера.

Интересно проследить зависимость размеров вихря от соотношения расходов Q_1/Q_0 , Q_2/Q_0 в ветвях. На фиг. 3 показана зависимость относительной ширины вихря $h' = h/d$ в первой ветви от числа Рейнольдса, рассчитанного по скорости потока в основной трубке, при различных относительных расходах для воды (сплошные кривые) и раствора полимера с концентрацией $c = 10^{-5}$ г/мл (штриховые кривые). Измерения проводились для трубок с диаметром $d = 3$ мм для следующих значений относительных расходов в ветвях: $q_1 = Q_1/Q_2 = 0,2; 0,35; 0,5$ (кривые 1, 2, 3 соответственно). Видно, что начало образования вихря зависит от соотношения расходов и, как было сказано выше, заметно затягивается наличием в растворе полимера.

На фиг. 4 представлена зависимость критического числа Рейнольдса, т. е. числа Рейнольдса, выше которого появляется вихрь, от соотношения расходов в ветвях q_1 .

Особенно важным с точки зрения объяснения механизма воздействия полимера на кровообращение, в частности предотвращения развития атеросклероза, было исследование влияния этих полимеров на образование застойных зон. Оказалось, что если затягивание эффекта интенсивного вихреобразования за местным сопротивлением в трубках с диаметром 10 мм при концентрации полимера 10^{-5} г/мл составляло по числу Re примерно 15%, то затягивание начала образования застойных зон в тех же условиях уже достигало 60%.

Проверка существования зависимости эффекта влияния полимеров от масштаба течения показала, что гипотеза, высказанная в [9], верна. На фиг. 2 показаны зависимости относительной длины вихря за бифуркацией от числа Рейнольдса для двух геометрически подобных трубок с ответвлениями. Диаметры всех трубок в малой модели равны 3 мм, в большой — 12 мм. Кривые 1, 4 получены для воды, 3, 5 — для водного раствора полимера с концентрацией 10^{-5} г/мл. Видно, что при добавлении в жидкость полимера происходит смещение критических значений числа Re_* : минимальное значение числа Рейнольдса, при котором возникает вихрь, — в малой модели $Re_* \approx 75$ (для воды ~ 55), в большой $Re_{2*} \approx 190$ (для воды ~ 155), т. е. в малой модели величина смещения критического числа Re_* составила 36%, в большой — 22%.

Таким образом, действительно наблюдается тенденция к увеличению эффекта затягивания процесса вихреобразования с помощью полимера при уменьшении масштаба течения. Кроме того, видно, что возникновение вихря в модели с диаметром трубок 3 мм происходит при существенно меньшем числе Рейнольдса ($Re_{1*} \approx 55$), чем в модели с диаметрами трубок 12 мм ($Re_{2*} \approx 155$). Это отличие, по-видимому, связано с влиянием не учтенного, но существенного параметра типа неоднородности стенок в месте бифуркации, которая возникает при изготовлении трубок. Кроме того, данный эффект может быть связан с наличием в потоке визуализирующих частиц, которые способны создавать дополнительную неустойчивость. В любом случае в задаче появляется новый безразмерный параметр: отношение диаметра частицы, размера неоднородности или продольного радиуса кривизны стенки к диаметру трубки.

В проведенных экспериментах установлено, что введение в жидкость полимера приводит к затягиванию критических величин числа Рейнольдса в область больших его значений, при этом наблюдается тенденция к увеличению этого эффекта с уменьшением масштаба течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wurzinger L. J., Blasberg P., Schmid-Schönbein H. Towards a concept of thrombosis in accelerated flow: rheology, fluid dynamics and biochemistry // *Biorheology*. 1985. V. 22. № 5. P. 437-449.
2. Wurzinger L. J., Blasberg P., Schmid-Schönbein H. Rheological aspects of thrombotic processes in flow // *VASA*. 1984. V. 13. № 4. P. 305-310.
3. Karino Takeshi, Goldsmith Harry L. Particle flow behavior in models of branching vessels. 2. Effects of branching angle and diameter ratio of flow patterns // *Biorheology*. 1985. V. 22. № 2. P. 87-104.
4. Karino T., Mabuchi S., Asakura T. Fluid mechanical factors in atherogenesis in man // *Proc. 40th Annu. Conf. Eng. Med. and Biol., Niagara Falls, Sept. 10-13, 1987*. Washington, D. C., 1987. P. 182.
5. Toms B. A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes of large Reynolds numbers // *Proc. 1st Int. Congr. Rheol. Amsterdam, 1948*. V. 2. P. 135-141.
6. Голубь А. С., Григорян С. С. и др. Влияние полиэтиленоксида на капиллярный кровоток при диабете у крыс // *Докл. АН СССР*. 1987. Т. 295. № 4. С. 813-815.
7. Ганнушкина И. В., Каменева М. В., Ангелова А. Л. Влияние на системную гемодинамику полимеров, снижающих гидродинамическое сопротивление // *Бюл. эксперим. биологии и медицины*. 1988. № 11. С. 533-536.
8. Григорян С. С., Каменева М. В., Шахназаров А. А. О влиянии растворимых в крови высокомолекулярных соединений на гемодинамику // *Докл. АН СССР*. 1976. Т. 231. № 5. С. 1070-1073.
9. Каменева М. В., Полякова М. С., Гвоздкова И. А. О природе влияния снижающих гидродинамическое сопротивление полимеров на кровообращение // *Докл. АН СССР*. 1988. Т. 298. № 5. С. 1253-1256.

Москва

Поступила в редакцию
2.XI.1988

УДК 533.6.01:537.84

© 1990 г.

В. Ю. ЗАХАРОВ, И. С. ШИКИН

ПРОДОЛЬНЫЕ ПРОСТЫЕ ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ С АНИЗОТРОПНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Изучаются простые волны, распространяющиеся вдоль магнитного поля в анизотропной плазме, на основе системы магнитогидродинамических уравнений, учитывающей потоки тепловой энергии ионов [1, 2]. В [3] было показано, что изучаемые волны могут быть двух типов, выяснен характер изменения параметров таких волн как функций плотности.

В данной работе получены точные решения для обоих типов волн, показано, что волна с меньшей фазовой скоростью может опрокидываться на участке разрежения, профиль волны с большей фазовой скоростью всегда опрокидывается на участке сжатия.

Рассмотрим распространение простых волн в бесстолкновительной плазме, находящейся в сильном магнитном поле, в рамках системы МГД-уравнений. Эта система для величин нулевого порядка по малому параметру $\epsilon = (\omega_{HT})^{-1}$ (ω_H — лармо-