

информации о наличии меди в ЛБ-пленках и может использоваться для контроля качества нанесенных лентмюровских слоев стеарата меди наряду с методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей.

Авторы благодарят В. Ф. Киселева за полезное обсуждение результатов работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Львов Ю. М., Фейгин Л. А.//УФН. 1987. 152, № 4. С. 698.
2. Блинов Л. М.//УФН. 1987. 152, № 4. С. 701.
3. Барро А., Вандевивер М.//Нелинейные оптические свойства органических молекул и кристаллов. М., 1989. Т. 1. С. 345.
4. Киселев В. Ф., Львов Ю. М., Плотников С. С., Постникова О. А.//Микроэлектроника. 1990. 19, № 4. С. 341.
5. Jiang L. et al.//Book of Abstracts, 6 Int. Conf. on Organized Molecular Films, July 4—9 1993. P. 295.
6. Коновалов О. В., Фейгин Л. А.//ДАН. 1991. 320, № 2. С. 334.
7. Вавилов В. С., Киселев В. Ф., Мукашев Б. Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. М., 1990.
8. Карягин С. Н., Козлов С. Н., Плотников Г. С.//Изв. вузов. Физика. 1981. № 1. С. 92.
9. Кашкаров П. К., Петров А. В.//Поверхность. Физика, химия, механика. 1984. № 5. С. 92.
10. Козлов С. Н., Плотников Г. С.//Изв. вузов, Физика. 1978. № 10. С. 105.
11. Симон Ж., Андре Ж. Ж. Молекулярные полупроводники. М., 1988.
12. Левшин Л. В., Салецкий А. М. Оптические методы исследования молекулярных систем. М., 1994. Ч. 1.

Поступила в редакцию  
23.11.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1996. № 4

УДК 535.36:532.5.013.12

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛИМЕРА ПОЛИЭТИЛЕНОКСИДА НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И СТРУКТУРУ ПОТОКА

М. С. Полякова, М. А. Сенашенко

(кафедра общей физики и волновых процессов)

Методом лазерной доплеровской анемометрии исследовались профили скорости в различных сечениях трубок со стенозом для растворов с полимером и без него. Показано, что введение полимера уменьшает градиент скорости как вдоль потока, так и в поперечном сечении трубки. Одновременно методом, использующим гибкую мембрану, измерялся перепад давлений и вычислялся коэффициент сопротивления трубок. Доказано, что уменьшение сопротивления при введении полимера связано с изменением структуры потока.

В 1948 г. для турбулентного течения был открыт эффект Томса [1], заключающийся в том, что добавление в жидкость в малых количествах линейных высокомолекулярных полимеров уменьшает ее гидродинамическое сопротивление. Многочисленные эксперименты по введению снижающих сопротивление полимеров (ССП) в кровь с концентрацией от  $10^{-6}$  до  $10^{-4}$  г/мл экспериментальным животным [2—4] показали, что ССП увеличивают скорость кровотока и снижают артериальное давление, не влияя на диаметры сосудов [5], вязкость, pH крови [6], при этом они не вызывают острой токсичности [7].

В работе [4] была предложена гипотеза о том, что ССП влияют на гидродинамическое сопротивление, изменяя структуру потока. Эта

гипотеза была подтверждена модельными опытами на стеклянных трубках со стенозом [8] или тройником [9]. Измерялась зависимость размеров вихря от расхода жидкости без полимера и с полимером различной концентрации. Исследования показали, что при добавлении полимера с концентрацией  $10^{-5}$  г/мл число Рейнольдса, при котором начинается образование вихрей, увеличивается на 15—20%. Кроме того, введение полимера уменьшает максимальные размеры вихря примерно на 7—10%. К настоящему моменту гипотеза о том, что ССП уменьшает сопротивление кровеносной сети, уменьшая возмущения потока на локальных неоднородностях, считается доказанной, однако количественные измерения изменения сопротивления проведены только на животных для больших участков кровеносной сети. Модельные эксперименты по измерению влияния полимера на гидродинамическое сопротивление отдельных локальных неоднородностей в литературе отсутствуют. Проведенные нами эксперименты позволяют частично ликвидировать этот пробел.

Одной из важнейших характеристик гидродинамической сосудистой системы является безразмерный коэффициент гидродинамического сопротивления  $\xi$  некоторого участка сети, определяемый формулой  $\Delta p = \xi \rho v^2 / 2$ , где  $\Delta p$  — перепад давлений на этом участке,  $\rho$  — плотность жидкости,  $v$  — средняя скорость потока. В некоторых случаях вместо безразмерного коэффициента  $\xi$  для изучения сопротивления участка сети удобно использовать коэффициент  $R$ , определяемый формулой  $\Delta p = RQ$ , где  $Q$  — расход жидкости.

Измерения коэффициентов  $\xi$  и  $R$  проведены для различных локальных неоднородностей при числах Рейнольдса порядка  $10^3$ — $10^5$  и суммированы в справочниках по гидравлике, например, [10]. В потоках с числами Рейнольдса, соответствующими кровеносной сети (от единиц до 1000), измерения коэффициентов  $\xi$  и  $R$  проведены лишь несколькими авторами [11—13] для некоторых модельных трубок с локальными неоднородностями. Исследования влияния полимера на коэффициенты  $R$  и  $\xi$  в литературе отсутствуют.

### Объекты измерения и методика

Измерения проводились на пяти модельных трубках со стенозом. Трубки различались между собой степенью пережатия в области стеноза ( $\alpha = d_1/d_2$ ), а также градиентом изменения сечения вдоль потока, который можно охарактеризовать параметром  $\beta = (d_1 - d_2)/l_2$  (см. рис. 1). Степень пережатия  $\alpha$  соответствовала уменьшению площади поперечного сечения в перетяжке до 5—10% от площади сечения на входе в трубку, т. е. развитому склерозу. Она минимальна для трубки № 2, несколько больше для трубок № 1, 3 и 5 и максимальна для трубки № 4. Параметр  $\beta$  минимален для трубки № 2, почти вдвое больше для трубок № 4 и 5 и в 4 раза — для трубок № 1 и 3.

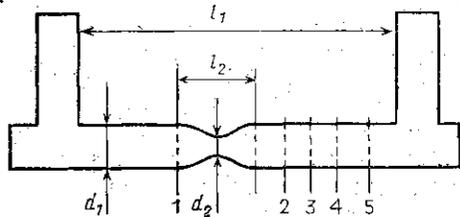


Рис. 1. Геометрия трубок, в которых проводились измерения. Размеры для разных трубок представлены в таблице

Для измерения перепада давлений был создан прибор, действие которого основывалось на прогибе упругой мембраны. Вода по труб-

кам подводилась в кювету. В одной из стенок кюветы было вырезано окно, закрытое мембраной, к которой приклеивалось тонкое зеркальце. Под действием давления жидкости мембрана прогибалась, отклоняя зеркало, на которое падал лазерный луч. По отклонению луча можно было однозначно судить о давлении жидкости в кювете. Калибровка прибора проводилась до и после эксперимента с целью контроля неизменности коэффициента упругости мембраны. В условиях стационарного течения давление попеременно измерялось на входе и выходе трубки, что позволяло вычислить перепад давлений на ее концах.

Размеры исследуемых трубок

№ трубки	$l_1$ , мм	$l_2$ , мм	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм
1	141	10	8	2,3
2	291	20	6	2
3	297	10	8	2
4	286	25	8	1,8
5	290	25	8,5	2,3

*Примечание.* В таблице указаны внутренние диаметры трубок.

Для измерения профилей скорости использовалась двухлучевая дифференциальная схема лазерного доплеровского анемометра, описанного в нашей ранней работе [8]. Применялся He—Ne одномодовый лазер ЛГМ 207А с длиной волны 0,6328 мкм. В жидкость добавлялись светорассеивающие частицы латекса полистирола диаметром 0,86 мкм. Измерительный объем составлял 0,005 мм<sup>3</sup>.

### Зависимость гидродинамического сопротивления от числа Рейнольдса

На рис. 2 представлены кривые зависимостей перепада давлений между концами трубки от числа Рейнольдса для одной из исследуемых трубок. Для остальных трубок получились подобные зависимости. Чтобы не загромождать рисунок, ошибки показаны только на одной кривой. Для остальных кривых они имеют тот же порядок.

Из графика видно, что кривая перепада давлений для концентрации полимера  $10^{-4}$  г/мл лежит значительно ниже, чем кривая для воды без полимера, а значения для концентраций  $10^{-5}$  и  $10^{-6}$  г/мл расположены между этими кривыми. Достоверно можно сказать, что полимер снижает перепад давлений, а следовательно, и гидродинамическое сопротивление. Интересно отметить, что при числах Рейнольдса  $Re$ , меньших некоторого критического, принимающего значения от 150 до 300 для различных трубок, кривые  $\Delta p(Re)$  для полимера с различными концентрациями практически не различаются между собой, хотя лежат ниже, чем кривые для воды. Можно предположить, что при малых  $Re$  даже самой малой концентрации полимера ( $10^{-6}$  г/мл) достаточно, чтобы максимально подавить возникающие элементы неста-

ционарности потока: вихреобразование, застойные зоны и т. п. Однако с ростом  $Re$  эти явления усиливаются, и для большего снижения сопротивления нужно большее содержание полимера.

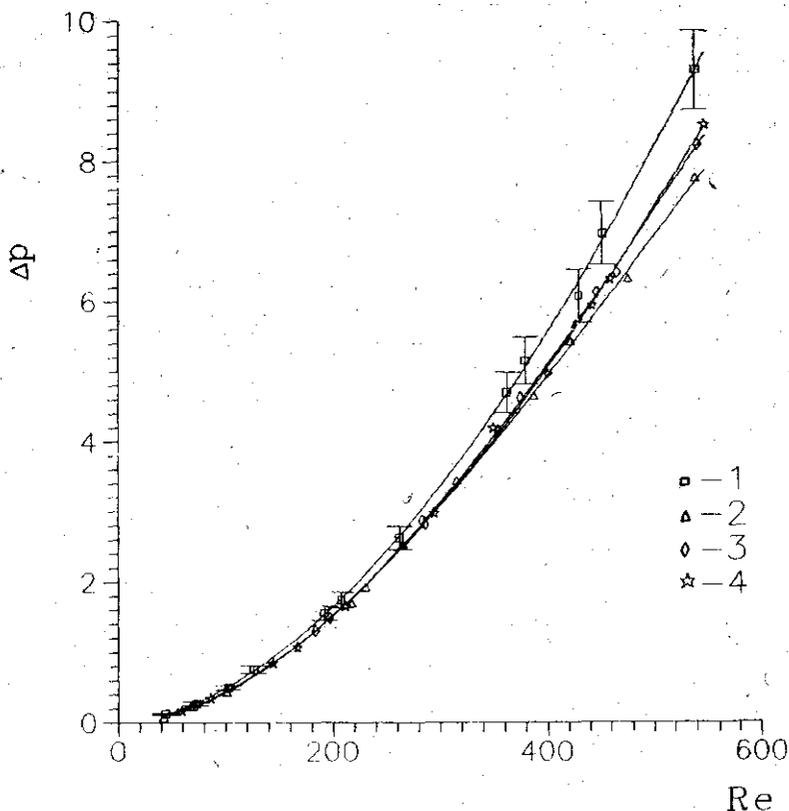


Рис. 2. Зависимость перепада давлений на концах трубки от числа Рейнольдса (трубка № 5). Концентрация полимера в растворе  $n=0$  (1),  $10^{-4}$  (2),  $10^{-5}$  (3) и  $10^{-6}$  г/мл (4), давление дано в миллиметрах водного столба (1 мм вод. ст. = 9,8 Па)

По известным зависимостям  $\Delta p(Re)$  были пересчитаны зависимости коэффициентов сопротивления  $R$  от  $Re$ . Напомним, что для цилиндрической трубки без сужения (длиной  $l_1=290$  мм, диаметром  $d_1=8$  мм) коэффициент  $R$ ; согласно закону Пуазейля, не зависит от числа Рейнольдса и равен  $R=0,03$  кг/(см<sup>4</sup>·с). Для трубок с пережатием коэффициент  $R$  значительно больше. При  $Re=100$  найденные значения коэффициента сопротивления  $R$  для пяти трубок соответственно равны 1,1; 0,75; 3,6; 3,6 и 1,0 кг/(см<sup>4</sup>·с). Видно, что минимальный коэффициент  $R$  соответствует трубке № 2, имеющей минимальное пережатие и плавный градиент сечения. Максимальное сопротивление имеют трубки № 3 и 4. Трубка № 4 соответствует максимальному пережатию, а трубка № 3 — максимальному градиенту сечения. Степень пережатия влияет на коэффициент  $R$  сильнее, чем градиент сечения, о чем свидетельствует сравнение коэффициентов  $R$  для трубок № 1 и 5 (одинаковая степень пережатия, градиент сечения трубки № 1 вдвое больше, чем трубки № 5) и трубок № 1 и 3 (одинаковые градиенты

изменения сечения, пережатие для трубки № 3 больше). С увеличением числа Рейнольдса коэффициенты  $R$  для всех трубок растут: для  $Re=300$  примерно в  $2,1 \div 2,4$  раза; для  $Re=500$  в  $3-4$  раза.

Введение полимера в концентрации  $10^{-4}$  г/мл приводит к снижению коэффициента  $R$ . Относительное уменьшение  $R$  не зависит от  $Re$  для трубок № 1, 3, 4 и 5 и составляет  $8 \div 10\%$  для трубок № 3 и 4 и  $15 \div 20\%$  для трубок № 1 и 5. Для трубки № 2, имеющей минимальное значение коэффициента сопротивления  $R$  для любого числа Рейнольдса, влияние полимера зависит от последнего. Полимер снижает  $R$  на  $9\%$  для  $Re=100$  и на  $19\%$  для  $Re=500$ . Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее чувствительными (в процентном отношении) к влиянию полимера оказываются трубки с более плавными изменениями сечения, хотя абсолютные значения изменения  $R$  при введении полимера максимальны для трубок с наиболее резкими изменениями сечения.

Расчитанные значения безразмерного коэффициента  $\xi$  колеблются в пределах от 400 до 5000 в зависимости от  $Re$  и характеристик трубки. Это на 2—3 порядка превышает величины измеренных в работе [13] коэффициентов гидродинамического сопротивления для тройников. Однако с учетом высокой степени пережатия исследуемых трубок такие цифры вполне допустимы.

### Зависимость длины вихря от числа Рейнольдса

Для изучения влияния ССП на структуру потока на одной из трубок были измерены зависимости длины вихря, возникающего за стенозом, от  $Re$  для воды и раствора полимера с концентрацией  $10^{-4}$  г/мл. Процесс развития вихрей в потоке визуализировался путем добавления в жидкость светорассеивающих частиц водно-дисперсионной краски. Данные согласуются с результатами экспериментов, проведенных нами ранее и описанных в работе [8]. Полимер на  $15-20\%$  увеличивает  $Re$ , при котором начинается процесс вихреобразования, а также уменьшает длину вихря (на  $20-40\%$  в зависимости от  $Re$ ).

### Профили скорости

Для проверки гипотезы о том, что снижение гидродинамического сопротивления при добавлении полимера обусловлено его воздействием на структуру потока, кроме измерений размеров вихрей методом лазерной доплеровской анемометрии были проведены измерения профиля скорости в нескольких различных сечениях при разных значениях числа Рейнольдса для трубок № 1 и 5. Результаты измерений для трубки № 5 представлены на рис. 3. Около каждой пары кривых (для воды и раствора полимера) стоит цифра, обозначающая номер сечения, в котором эти кривые были сняты (см. рис. 1).

Из рис. 3 можно видеть, как изменяется профиль скорости вдоль трубки и какое влияние на это изменение оказывает введение полимера. До стеноза профиль имеет параболическую форму с максимальной скоростью около  $6$  мм/с (сечение 1). Сразу после стеноза (сечение 2) без полимера эта максимальная скорость увеличивается в 4 раза и достигает  $24$  мм/с, при этом образуется вихрь. При введении же полимера эта скорость увеличивается всего в 3 раза, вихрь не образуется. В следующем сечении разница между максимальными скоростями воды и раствора полимера уменьшается (они составляют 11 и  $9,5$  мм/с соответственно). В последних двух сечениях профили скорос-

тей приближаются к параболическим. Величины скоростей становятся примерно такими же, как и в сечении до стеноза, максимальная скорость течения раствора полимера превышает максимальную скорость течения воды. Это обусловлено тем, что измерения для раствора полимера проводились при числе Рейнольдса несколько большем, чем для воды.

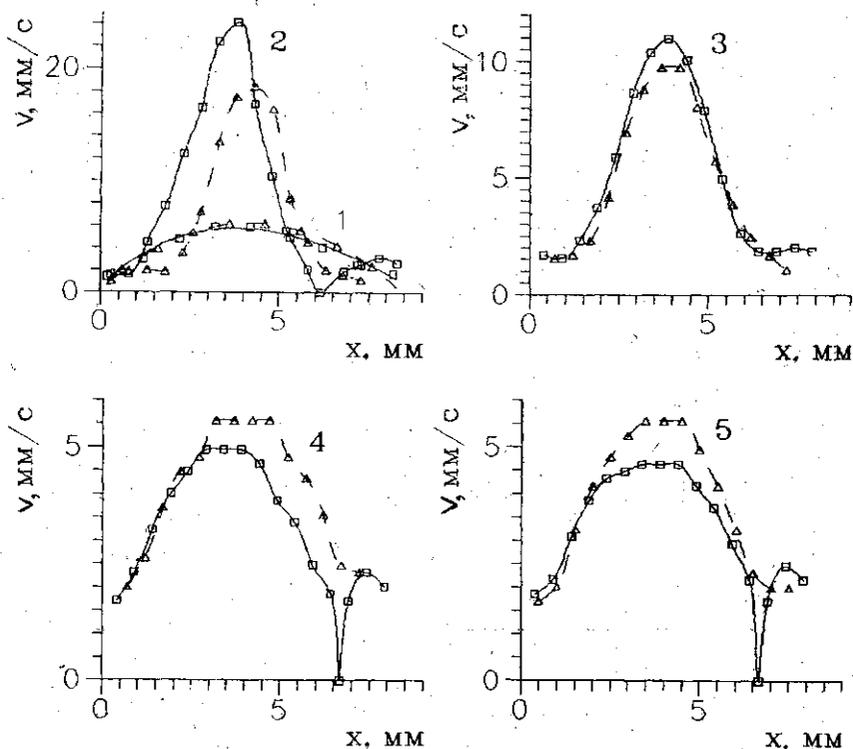


Рис. 3. Профили скорости для сечений № 1—5 (см. рис. 1). Трубка № 5. Числа Рейнольдса  $Re$  равны 28,8 для воды (точки нанесены квадратами) и 30,6 для раствора полимера с концентрацией  $10^{-5}$  г/мл (точки нанесены треугольниками). Расстояния  $a_i$  от плоскости, проходящей через стеноз, до  $i$ -го сечения равны: 36 ( $a_2$ ), 52 ( $a_3$ ), 65 ( $a_4$ ) и 96 мм ( $a_5$ )

Таким образом, при исследовании влияния полимера на профили скорости были обнаружены следующие закономерности. При введении полимера уменьшается максимальная скорость течения как в области вихря, так и в области основного течения (кривые 2 и 3 на рис. 3). В некоторых сечениях при введении полимера вихри исчезают совсем. В качестве примеров можно привести кривые 2—5 на рис. 3. Наконец, при введении полимера разность максимальных скоростей в последовательных сечениях вдоль потока уменьшается, т. е. полимер снижает градиент скорости вдоль потока. Указанные эффекты проявляются при измерениях на трубках № 1 и 5, однако на трубке № 5 они выражены более отчетливо, чем на трубке № 1, что обусловлено большей степенью пережатия в области стеноза трубки № 5.

Таким образом, исследования профилей скорости показали, что полимер действительно изменяет структуру потока, а так как на одной

и той же трубке для одних и тех же чисел Рейнольдса при введении полимера было отмечено уменьшение гидродинамического сопротивления, то можно сделать вывод, что сделанные в ходе настоящей работы эксперименты подтверждают гипотезу о чисто гидродинамической природе влияния ССП.

Авторы выражают благодарность чл.-корр. С. С. Григоряну за постановку задачи и обсуждения проблемы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Toms V. A.//Proc. 1 Int. Congr. Rheol. Amsterdam, 1948. V. 2. P. 135.
2. Mostardi R. A., Greene H. L., Nokes R. F.//Biorheology. 1967. 3. P. 137.
3. Mostardi R. A., Thomas L. C., Greene H. L. et al.//Biorheology. 1978. 15. P. 1.
4. Григорян С. С., Каменева М. В., Шахназаров А. А.//ДАН. 1976. 231, № 5. С. 1070.
5. Соколова И. А., Шахназаров А. А., Тимкина Н. И. и др.//Бюл. экпер. биол. и мед. 1993. № 11. С. 552.
6. Ганнушкина И. В., Григорян С. С. и др.//Патофизиология. 1982. № 3. С. 58.
7. Каменева М. В., Парфенов А. С.//ДАН. 1986. 288, № 3. С. 575.
8. Каменева М. В., Полякова М. С., Гвоздкова И. А.//ДАН. 1988. 298, № 5. С. 1253.
9. Каменева М. В., Полякова М. С., Федосеева Е. В.//Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа. 1990. С. 172.
10. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., 1975.
11. Back L. H.; Cho Y. J., Crawford D. W.//Trans. of ASME, J. of Biomech. Engineering. 1986. 108. P. 251.
12. Liepsch D. W.//Biorheology. 1986. 23. P. 395.
13. Matsuo T., Okeda R., Higashino F.//Biorheology. 1989. 26. P. 799.

Поступила в редакцию  
09.12.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1996. № 4

УДК 533.082.5

### К ТЕОРИИ ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В ПЛАЗМЕ

О. М. Билак, С. Ю. Никитин

(кафедра общей физики и волновых процессов)

Рассматривается вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) мощного лазерного излучения в горячей неоднородной плазме. Получено выражение для инкремента ВКР, учитывающее затухание электронной плазменной волны, неоднородность плазмы и модуляцию излучения накачки.

#### Введение

Одной из актуальных проблем в современных исследованиях по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) является проблема подавления вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и вынужденного рассеяния Мандельштама—Бриллюена (ВРМБ) в плазме. Вынужденное комбинационное рассеяние представляет собой процесс, при котором падающая мощная электромагнитная волна распадается на электронную плазменную волну (плазмон) и рассеянную электромагнитную волну. Процесс ВКР потенциально опасен для ЛТС, поскольку электронная плазменная волна ускоряет электроны, что приводит к нежелательному преждевременному нагреву мишени.