

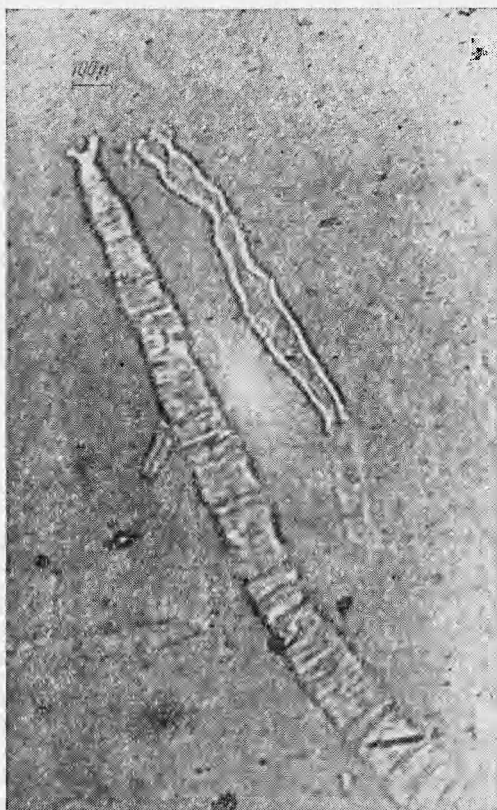
О СТРУКТУРЕ СЛАБЫХ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРОВ, ОБНАРУЖИВАЮЩИХ ЭФФЕКТ ГАШЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Г. И. Баренблатт, И. Г. Булина, В. Н. Калашиников,
Н. М. Калининченко
(Москва)

В работах [1-9] было обнаружено заметное снижение сопротивления турбулентному течению жидкости при растворении в жидкости весьма малых добавок некоторых полимеров. Уменьшение размывания струйки краски в таких потоках при растворении полимеров показало [10,11], что, по крайней мере, в некоторых случаях уменьшение сопротивления связано с гашением турбулентности. Поскольку размер молекул полимеров ничтожно мал сравнительно с размером минимальных вихрей, имеющихся в потоке (колмогоровским внутренним масштабом турбулентности), в качестве одного

из возможных объяснений эффекта было высказано предположение [12], что молекулы полимера захватывают молекулы растворителя, создавая сравнительно крупные и жесткие надмолекулярные образования, по величине сравнимые с внутренним масштабом турбулентности и влияющие на нее. Гипотеза была косвенно подтверждена резким падением проницаемости для водных растворов натривой соли карбоксиметилцеллюлозы (одного из наиболее эффективных в отношении снижения сопротивления полимера) фильтров и капилляров при уменьшении их диаметра до величины порядка колмогоровского масштаба исследованных в [8,10] течений; контрольные опыты с ньютоновской жидкостью той же вязкости (с водным раствором глицерина) не обнаружили подобной аномалии. В настоящей заметке приводятся результаты микроскопических наблюдений растворов натривой соли карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) в воде, непосредственно подтверждающих наличие в них надмолекулярных образований.

Растворы различных концентраций готовились путем растворения сухой КМЦ в воде при комнатной температуре. Для микроскопических исследований растворов был использован поляризационный микроскоп. Наблюдения проводились в проходящем поляризованном и обычном свете при небольших 50—150-кратных увеличениях. Исследуемый раствор помещался под микроскопом на предметном стекле или в сте-



Фиг. 1

клянном капилляре, причем наблюдения проводились как при неподвижном растворе, так и при течении его по капилляру. Были использованы круглые (с диаметром до 1.5 мм) и специально изготовленные плоские капилляры квадратного сечения со сторонами 0.8, 0.5 и 0.2 мм. Плоские капилляры были составлены из двух тонких стекол с проложенными между ними на нужном расстоянии и приклеенными к стеклам двумя полосками фольги. Исследование движения растворов проводилось при скоростях до 1 см/сек. Движение фиксировалось на кинопленке с частотой 100 кад/сек.

При наблюдении растворов КМЦ под микроскопом в них обнаружены прозрачные образования с отличным от воды коэффициентом преломления. Это позволило фиксировать их даже без особых мер визуализации. Более четко эти образования можно наблюдать при подкрашивании раствора красителем. При этом у образований наблюдается более темная окраска, чем у окружающей их жидкости. Но наиболее удобным методом наблюдения явился метод наблюдения в поляризованном свете, поскольку исследуемые формы обладают двойным лучепреломлением. На фиг. 1 приведены фотографии

наиболее характерных образований, сделанные в поляризованном свете. Как видно из фотографий, образования представляют собой формы, обладающие значительной анизодиметрией. Поперечный размер образований составляет 50—200 мк, продольный достигает у некоторых образований 1000 мк. Обращает на себя внимание периодичность в строении образований — чередование светлых и темных поперечных полос. Анизодиметрия и периодичность строения образований позволяют, по установившейся терминологии, отнести их к фибриллярным структурам (термин «глобулы», использованный в нашей прежней публикации [12], в этом смысле для надмолекулярных структур растворов КМЦ неудачен).

На приведенных фотографиях видны как длинные фибриллы веретенообразной формы с характерными двумя «ушками» на концах, так и короткие фибриллы различной длины, более похожие на обломки длинных фибрилл, чем на целые структуры. Вдоль оси фибрилл проходит характерная продольная полоса. Это позволило предположить, что фибриллы имеют внутреннюю полость. Предположение было подтверждено непосредственным наблюдением под микроскопом обломков фибрилл под различными углами зрения. Эти обломки представляют собой короткие трубочки, внутренний диаметр которых примерно вдвое меньше наружного.

Структура стенок фибрилл хорошо наблюдается в поляризованном свете при скрещенных поляризаторах микроскопа и угле между осью фибриллы и плоскостью поляризации, соответствующем наибольшему затемнению фибриллы. При этом можно видеть, что стенки фибрилл сотканы из параллельно уложенных спиралей. Обычно таких спиралей две, реже — три.

При испарении растворителя из капли раствора, помещенной под микроскопом, можно наблюдать, что спирали фибрилл сжимаются, фибриллы во много раз уменьшаются в диаметре и несколько укорачиваются, пока на предметном стекле не остаются частицы сухого полимера, которые при добавлении воды вновь принимают прежние размеры. Это указывает на то, что водные растворы КМЦ представляют собой коллоидные растворы, частицы которых весьма сильно насыщены растворителем.

При течении раствора фибриллы выстраиваются таким образом, что их длинные оси совпадают с линиями тока течения. Наблюдаемое уменьшение вязкости у растворов КМЦ с увеличением скорости сдвига [13], по-видимому, может быть объяснено ориентацией фибрилл в потоке.

Фибриллы представляют собой упругие частицы. Они могут, не разрушаясь, значительно деформироваться под действием приложенных сил, вновь восстанавливая первоначальную форму после снятия нагрузки. На отснятой киноленте был зафиксирован момент, когда одна из фибрилл подошла боком к устью капилляра, перекрыв таким образом его вход. Затем под действием перепада давления фибрилла сложилась вдвое и в таком виде вошла в капилляр. По выходе из капилляра она вновь распрямилась, приняв прежнюю прямолинейную форму.

Фибриллы могут упруго деформироваться и в осевом направлении. Была зафиксирована ситуация, когда сечение капилляра 0.2 мм было перекрыто фибриллой, расположенной в нем так, что большая ось ее совпадала с осью капилляра. Увеличение давления, приложенного для продавливания фибриллы через капилляр, приводило к некоторому, хотя и незначительному, сокращению длины фибриллы. Первоначальная длина фибриллы вновь восстанавливалась при снятии давления. Упругость фибрилл может быть причиной наблюдаемой поперечной упругости растворов КМЦ [14].

Как уже отмечалось выше, фибриллы представляют собой прозрачные образования, обладающие двойным лучепреломлением. Их оптическая ось совпадает с большой осью симметрии. Ориентация фибрилл в потоке должна повлечь за собой появление избранных оптического направления у всего потока. Поток должен проявить интегральный эффект двойного лучепреломления. Двойное лучепреломление присуще потокам многих полимерных растворов [15], и, по-видимому, одной из причин его является наличие в растворе анизодиметрических двояколучепреломляющих образований, ориентирующихся при течении.

Содержание воды в фибриллах весьма значительно и увеличивается с уменьшением концентрации раствора. Диаметр фибрилл увеличивается с уменьшением концентрации раствора, а их яркость под микроскопом при скрещенных поляризаторах уменьшается. При малых концентрациях раствора (меньше 0.3% по весу) фибриллы, по-видимому, столь сильно насыщены водой, что их визуальное наблюдение невозможно ни одним из описанных выше методов, однако их присутствие в слабых растворах устанавливается косвенными методами, изложенными в предыдущей работе [12].

При концентрациях раствора порядка 1% по весу содержание воды в фибриллах значительно меньше, чем при сильных разбавлениях, однако оно остается достаточно большим, что устанавливается резким (4—5-кратным) уменьшением диаметра и некоторым сокращением длины фибриллы при ее высыхании.

Интенсивная иммобилизация определенной части растворителя полимером может объяснить тот факт, что ничтожные добавки некоторых полимеров столь сильно влияют на гидродинамические характеристики течения растворов. Малая добавка полимера приводит к возникновению в растворе достаточно жестких и крупных образований,

состоящих в основном из молекул растворителя, и поэтому содержащихся в концентрациях достаточных, чтобы оказать заметное гидродинамическое воздействие на течение, в частности, — снизить интенсивность пульсаций при турбулентном течении.

Механизм добавочной диссипации пульсационной энергии за счет установленных здесь крупных надмолекулярных образований может быть различным.

Во-первых он может быть связан непосредственно с относительным движением фибрилл в окружающей жидкости и упругой деформацией фибрилл за счет действия на них малых вихрей с последующей диссипацией в тепло энергии упругих колебаний фибрилл. Следует отметить, что М. Тулин (Hydronautics Inc., США) в неопубликованной работе высказал следующую очень интересную гипотезу о механизме гашения турбулентности. Согласно Тулину, гашение турбулентности связано с тем, что под действием высоких скоростей сдвига, имеющихся в потоке, закрученные длинные молекулы распрямляются и запасают упругую энергию, которая излучается затем благодаря созданию в жидкости волн сдвига, скорости которых сравнимы с пульсациями скорости потока. По нашему мнению, это явление может иметь место, но не на молекулярном, а на существенно надмолекулярном уровне, так что скорости сдвига (вихри) деформируют не отдельные полимерные молекулы, а целые глобулы или фибриллы.

Во-вторых, глобулы (или фибриллы), образуя поверхностную пленку на стенках трубы или обтекаемого тела, могут менять условия формирования вихрей в пристенной области. Они могут также осуществлять дополнительное гашение вихрей в пристенной области за счет относительных колебательных движений или деформирования и образования волн сдвига.

Механизм действия малых добавок полимеров на потоки жидкости нуждается, разумеется, в дополнительном изучении, однако можно считать установленным, что при исследовании турбулентных движений слабых растворов полимеров необходимо учитывать наличие в них надмолекулярной структуры.

Авторы благодарят В. А. Городцова и Г. И. Шоломовича за обсуждение, В. А. Авсенко, Е. Ф. Лысых и З. П. Титову за участие в экспериментах.

НИИ механики МГУ
Ин-т проблем механики АН СССР

Поступила 5 VI 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Toms V. A. Proceedings International Rheological Congress. North-Holland Publishing Co. Amsterdam, Netherland, 1949.
2. Dodge D. W., Metzner A. B. Turbulent flow of non-Newtonian systems, J. Amer. Inst. Chem. Engrs. 1959, vol. 5, № 2.
3. Shaver R. G., Merrill E. W. Turbulent flow of pseudoplastic solutions in straight cylindrical tubes. J. Amer. Inst. Chem. Engrs., 1959, vol. 5, № 2.
4. Savins J. G. Some comments on pumping requirements for non-Newtonian fluids. J. Inst. Petrol., 1961, vol. 47.
5. Ousterhout R. S., Hall C. D. Reduction of friction loss in fracturing operations. J. Petrol. Tech., 1961, vol. 13.
6. Fabula A. G. The Toms phenomenon in the turbulent flow of a very dilute polymer solutions. Fourth International Congress on Rheology Paper L19, Brown University, Providence, 1963.
7. Эльперин И. Т., Смольский Б. М. Уплы́е паверхневых з'яў на працэсы пераносу, Весці АН Беларуск. ССР. Сер. фіз.-тэхн. н., 1965, № 2.
8. Баренблатт Г. И., Булина И. Г., Мясников В. П. Влияние растворов некоторых высокомолекулярных соединений на снижение сопротивления при обтекании тел турбулентным потоком, ПМТФ, 1965, № 4.
9. Sinclair Wells, jr. Anomalous turbulent flow of non-Newtonian fluids. AIAA Journal, 1965, 3, 10.
10. Баренблатт Г. И., Булина И. Г., Мясников В. П., Шоломович Г. И. О влиянии малых добавок растворимых высокомолекулярных соединений на режим движения жидкости. ПМТФ, 1965, № 4.
11. Gadd G. E. Turbulence damping and drag reduction produced by certain addition in water. Nature, 1965, vol 206, No. 4983.
12. Баренблатт Г. И., Булина И. Г., Зельдович Я. Б., Калашников В. Н., Шоломович Г. И. Об одном возможном механизме влияния малых добавок высокомолекулярных соединений на турбулентность ПМТФ, 1965, № 5.
13. Merrill E. W. Viscometric classification of polymer solutions Industr. Engng Chem. Fundamentals 1959, vol. 51.
14. Metzner A. B., Houghton W. T., Sailor R. A., White J. L. A method for the measurement of normal stresses in simple shearing flow. Trans. Soc. Rheol., 1961, vol. 5.
15. Vinogradov G. V., Manin V. N. An experimental study of elastic turbulence. Kolloid — Z. und Polymere, 1965, v. 201, № 2.