



ЭЛАСТИЧНАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ПРИ ТЕЧЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ В МИКРОКАНАЛАХ С ПЕРЕМЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ

Ахметов А. Т. , Власов С. А.** , Васильев А. В.* ,
Мавлетов М. В.* , Саметов С. П.* , Рахимов А. А.**

*Институт механики УНЦ РАН, Уфа

**АНО НТО «ИТИН», Москва

Аннотация. При течении разбавленного раствора высокомолекулярного полимера в каналах переменного сечения при низких числах Рейнольдса обнаруживается эластичная турбулентность, сопровождающаяся увеличением гидравлического сопротивления в несколько раз по сравнению с водой, хотя вязкость раствора только на 10–20% превышает вязкость воды. Это явление изучалось в моделях из стеклянных шариков Джеймсом и Маклареном (1978), в каналах переменного сечения — Калашниковым В. Н. (1987). В приведенных в работе экспериментах в плоских и объёмных моделях переменного сечения и в сложной структуре каналов, представляющей срез ядра нефтеносного пласта, проведена визуализация поля течений. Обнаружено увеличение гидравлического сопротивления во всех типах течения при низких числах Рейнольдса, пульсации в потоке с частотой 5–10 Гц. Грамотное использование эластичной турбулентности позволит существенно поднять эффективность заводнения при добыче нефти.

1. Введение

Достаточно детально течение вязкоупругих жидкостей в каналах переменного сечения было изучено в работах McLaren [1] и Калашникова В. Н. [2]. Калашниковым были обнаружены две работы 1926 года Hatchek, Jane [4] и Oswald [5], в которых бы-

ло замечено, что потоки таких жидкостей между коаксиальными цилиндрами ротационного вискозиметра и в капилляре трубчатого вискозиметра могут потерять устойчивость и турбулизоваться задолго до достижения числом Рейнольдса $Re = vD/\mu$ (v и D — характерные скорость и размер потока; μ — кинематическая вязкость) своего критического значения.

Уже тогда стало ясно, что возникновение этой ранней турбулентности можно связать с новым безразмерным параметром, включающим упругие характеристики среды. К. Вейссенберг был первым, кто отметил особую роль упругой обратимой деформации, подчеркнув аналогию между новой безразмерной величиной в анализе поведения вязкоупругих жидкостей, и числом Рейнольдса в гидродинамике обычных ньютоновских жидкостей [6]. Если число Рейнольдса является отношением сил инерции к вязким силам, то число Вейссенберга есть отношение упругих сил к вязким силам. Это можно пояснить справедливой при небольших скоростях деформации формулой [2]

$$We = (\sigma_{11} - \sigma_{22})/\sigma_{12},$$

где σ_{11} , σ_{22} — нормальные напряжения; σ_{12} — напряжение сдвига. Числитель последнего соотношения представляет упругие силы, знаменатель — вязкие.

Число Вейссенберга может быть представлено также в виде

$$We = \theta v/D,$$

в этом соотношении θ — время релаксации упругих напряжений при малых частотах возмущений или так называемое естественное время жидкости; v и D — характерные скорость и размер потока [2].

Потеря устойчивости может произойти как вследствие превосходства над стабилизирующими поток вязкими силами сил инерции, так и сил упругости. В первом случае с достижением параметром критического значения возникает обычная — ее

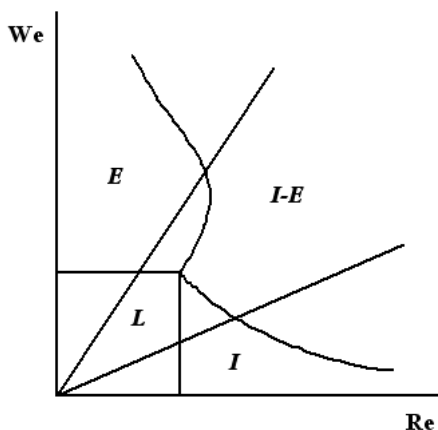


Рис. 1. Картина возникновения различных режимов течения вязкоупругих жидкостей. L — область ламинарного течения, E — область эластичной турбулентности, I — область инерционной турбулентности, $I-E$ — область инерционно-упругой турбулентности

можно назвать инерционной — турбулентность. Во втором случае, как только параметр We превзойдет свою критическую величину, появляется эластическая турбулентность. Это понятие В. Н. Калашников ввёл ещё в 1980 г. [3]. В случае больших значений как сил инерции, так и сил упругости, реализуется третий режим турбулентного течения, отличающийся от обсуждавшихся выше. В. Н. Калашников назвал этот режим — режимом инерционно-упругой турбулентности [2] и построил диаграмму режимов турбулентных течений (рис. 1). Разграничивающие линии, положение которых зависит от конкретной геометрии течения, делят квадрант на четыре области, соответствующие ламинарному и трем турбулентным режимам. Неньютоновские эффекты возникают при достаточно большом числе We и могут соответствовать или режиму эластической турбулентности, или режиму инерционно-упругой турбулентности (рис. 1) (буквы в областях означают режимы течений).

Течение разбавленных водных растворов полиоксиэтилена

(молекулярная масса $M = 7,73 \cdot 10^6$, концентрация $c = 2 \cdot 10^{-4}$) через трубки с периодически меняющимся поперечным сечением обнаружило, что при достаточно большом значении параметра $\theta \cdot v/D^2$ (отношение Re на We) проявляется резкое увеличение коэффициента гидравлического сопротивления [2]. На рис. 2(а) представлено изменение напора от расхода жидкости и на рис. 2(б) — коэффициентов сопротивления от Re (кривые 1 — вода, кривые 2 — раствор с концентрацией $c = 2 \cdot 10^{-4}$). В области малых расходов поведение полимерных растворов не отличается от поведения ньютоновских жидкостей. Увеличение расхода приводит к резкому 20-кратному возрастанию сопротивления. Было обнаружено, что при молекулярной массе ниже определенного критического числа, эластичная турбулентность не наблюдается.

Дэвидом Ф. Джеймсом и Д. Р. МакЛареном были проведены эксперименты по течению малоконцентрированных растворов ($c = 30 - 480$ ppm) полиоксиэтилен ($M = 9,4 \cdot 10^5$; $4,2 \cdot 10^6$; $9,7 \cdot 10^6$) через упаковку гранул (средние размеры 0,011, 0,022 и 0,045 см). В результате проведенных опытов было выявлено, что при достижении определенной скорости течения возникала эластичная турбулентность. Ее появление фиксировалось по отходу кривой для коэффициента сопротивления от ламинарного закона при числах Рейнольдса ($Re < 1$), меньших критического для инерционной турбулентности.

В более поздних работах по обнаружению эластичной турбулентности в микроканалах А. Гройсмана и В. Штейнберга исследовалось течение $c = 8 \cdot 10^{-3}$ разбавленных растворов полиакриламида (молекулярная масса $18 \cdot 10^6$) в сахарном сиропе (65% сахара и 1% NaCl), т.е. в жидкости с высокой вязкостью в периодичном криволинейном канале [7]. Также ими были изучены закручивающееся течение между двумя пластинами и течение Куэтта–Тэйлора между двумя цилиндрами [8]. Эластичная турбулентность проявлялась во всех типах течения при We порядка единицы и при очень низких Re ($< 0,1$). Отличительной чертой работ А. Гройсмана и В. Штейнберга является очень высокая

вязкость растворителя (0,32 Па·с) и, соответственно, полимерного раствора (0,45 Па·с). Авторы отмечают такие свойства турбулентности, как увеличение гидравлического сопротивления и перемешивание в потоке.

Хотя во всех приведенных выше работах наблюдается увеличение гидравлического сопротивления при течении в каналах переменного сечения, которое связывают с проявлением эластичной турбулентности, сама картина и физическая природа образующихся потоков остается непонятой. Данная работа посвящена изучению эластичной турбулентности с использованием методов визуализации и сравнение плоских и объемных течений.

В перспективе, кроме использования проявления эластичной турбулентности для создания микрожидкостных устройств [7], представляется практически важным использование повышения гидравлического сопротивления при малых числах Рейнольдса для новых технологий извлечения нефти.

2. Экспериментальные результаты и обсуждение

Мы исследовали течение разбавленных полимерных растворов в плоских и объемных моделях переменного поперечного сечения (рис. 3–7) и в сложной структуре каналов, отображающей срез керна нефтеносной породы (микромодель). В мировой практике модели, изготавливаемые фотолитографическим способом и отображающие сложную систему микроканалов, отражающие те или иные свойства пористых пород принято называть микромоделями. Рабочая площадь нашей микромодели составляет 4×2 см, глубина каналов 10 микрон (рис. 7).

В опытах использовался высокомолекулярный полимер — полиэтиленоксид (молекулярная масса — $8 \cdot 10^6$). Проводилось сравнение течения воды и водных разбавленных растворов полимера с концентрацией $c = 2 \cdot 10^{-4}$ в цилиндрических капиллярах (диаметр 100 мкм, длина 4 см и диаметр 600 мкм, длина 14 см), которое показало, что вязкость полимерного раствора на 20% больше вязкости воды.

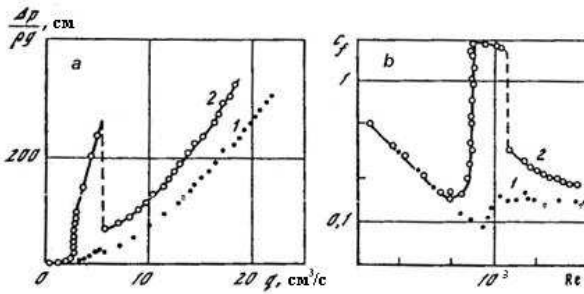


Рис. 2. Типичные черты аномалий, наблюдающихся при течении воды и полимерного раствора в каналах периодически меняющегося поперечного сечения

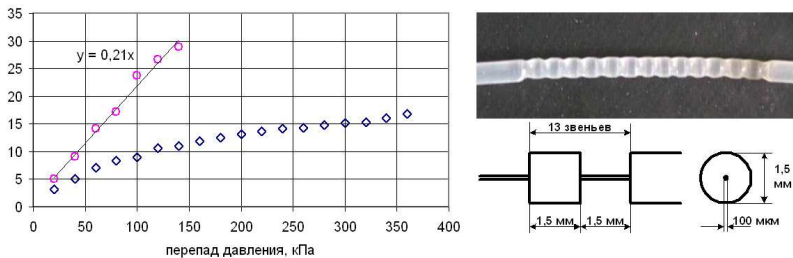


Рис. 3. Зависимость расхода жидкости через объемную модель поперечного кругового переменного сечения от перепада давления. Вода (кружки), треугольники (полимерный раствор с концентрацией 10^{-4}). Объемная модель поперечного кругового переменного сечения (справа)

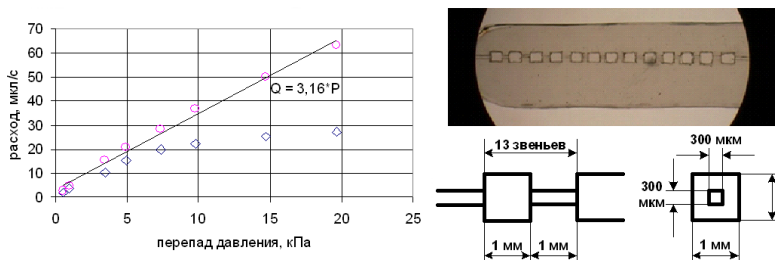


Рис. 4. Зависимость расхода через объемную модель поперечного квадратного переменного сечения от перепада давления. Вода (кружки), квадраты (полимерный раствор с концентрацией $2 \cdot 10^{-4}$). Объемная модель поперечного квадратного переменного сечения (справа)

Изучение расходных характеристик воды и $c = 2 \cdot 10^{-4}$ полимерного раствора для объемной модели круглого поперечного переменного сечения выявило линейную зависимость расхода от перепада давления для воды и нелинейную — для полимерного раствора (различия заметны буквально с первой точки). Расход для воды, по крайней мере, в три раза больше, чем для полимерного раствора (рис. 3), что указывает на существенное возрастание гидродинамического сопротивления даже для растворов полиэтиленоксида с малой концентрацией. Усредненная по сечению скорость потока полимерного раствора в узкой части изменялась в диапазоне 0,38–2 м/с ($Re = 30 - 180$).

Аналогичная ситуация наблюдается в случае объемной модели квадратного поперечного переменного сечения (рис. 4). Усредненная по сечению скорость потока полимерного раствора в узкой части изменялась в диапазоне 2–30 см/с ($Re = 5 - 80$). Усредненная по сечению скорость потока в широкой части модели на порядок ниже скоростей в узкой части, а число Рейнольдса — ниже втрое.

Для визуализации структуры потока на вход модели подавалась струйка окрашенной воды или полимерного раствора синего цвета. Поле течений воды через канал при перепаде давления 5 и 10 кПа в расширенной части выявило вихревые потоки, имеющие стационарную картину (рис. 5(а),(б)). При протекании полимерного раствора, начиная с перепадов давления порядка 0,4 кПа, что соответствует числу Рейнольдса равному 6, картина проявляет существенные отличия, выражающиеся в легких пульсациях центральной и вихревой части потока, заметно усиливающихся с возрастанием скорости потока. Картина течения полимерного раствора отличается от поля течения воды большей интенсивностью вихревых потоков и образованием пульсаций (рис. 5(в),(г)), как в центральной части потока, так и на границах канала. Частота пульсаций определялась из анализа покадровой съемки. Для случаев, приведенных на рис. 5, частота составляла 6 Гц при перепаде 5 кПа и около 10 Гц при перепаде 10 кПа, при этом амплитуда пульсаций центральной

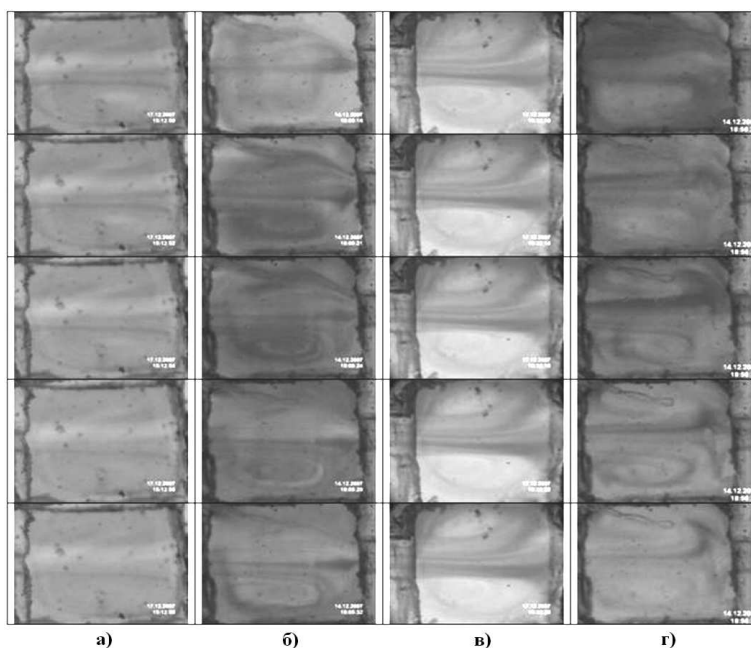


Рис. 5. Структура потока в расширенной части 4-ой ячейки объемной модели с переменным квадратным сечением при перепаде давления 5 кПа (а и б) и 10 кПа (в и г); а и в — вода, б и г — полимерный раствор

части потока достигает 300–500 мкм, т.е. примерно половину шириной части модели. Усредненная скорость потока полимерного раствора в узкой части модели 17 см/с ($Re = 45$) при перепаде давления 5 кПа и 30 см/с ($Re = 80$) — при 10 кПа. Проведенные исследования показывают, что поток полимерного раствора в канале переменного сечения обладает основными свойствами турбулентного потока: увеличение гидравлического сопротивления и интенсивное перемешивание. В сравнении с приведенной статической последовательностью кадров, на видеозаписи хорошо прослеживается динамика изменений течения и ярко проявляется пульсационный характер течения в широкой зоне.

Течение полимерного раствора через плоскую модель переменного сечения несколько отличается от описанного выше случая объемной модели меньшим различием в гидравлическом сопротивлении для воды и полимерного раствора (рис. 6). Пульсации проявляются менее интенсивно.

Изучение особенностей течения полимерного раствора в плоской системе микроканалов произвольной структуры производилось в микромодели, увеличенный под микроскопом участок которой, приведен на рис. 7 (справа). Расход по воде при течении через микромодель линейно растет с увеличением перепада давления. Полимерный раствор с концентрацией $2 \cdot 10^{-4}$ демонстрирует иное поведение расхода от перепада давления (рис. 7). Наблюдается некоторое увеличение гидравлического сопротивления с давлением (до 2-х раз по сравнению с водой). Усредненная по сечению скорость потока полимерного раствора в узкой части изменялась в диапазоне 0,07–2 см/с ($Re = 0,006 - 0,1$).

Одним из возможных приложений течений с эластичной турбулентностью является проблема извлечения нефти из пористых структур. Закачка воды и полимерного раствора в микромодель, заполненную нефтью, при одном и том же перепаде давления показало, что раствор полимера закачивается медленнее (рис. 8). При вытеснении полимерным раствором кривая объема прошедшей жидкости довольно быстро выходит на линейный режим.

Сравнение темпа вытеснения нефти из микромодели водой и разбавленным полимерным раствором (рис. 9) показывает, что при одинаковых объемах закачки вытеснение полимерным раствором эффективнее. После прохождения 3 объемов пор микромодели полимерным раствором и водой в случае полимера вытеснение происходит более интенсивно.

Можно предположить, что в объемной капиллярной структуре влияние эластичной турбулентности на эффективность вытеснения будет более существенным.

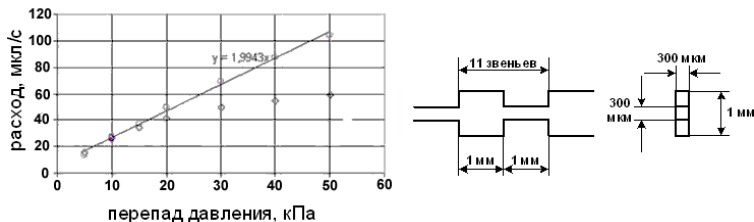


Рис. 6. Зависимость расхода через плоскую модель поперечного прямоугольного переменного сечения от перепада давления. Вода (кружки), квадраты (полимерный раствор с концентрацией $2 \cdot 10^{-4}$). Схематическое изображение звеньев плоской модели переменного сечения (справа)

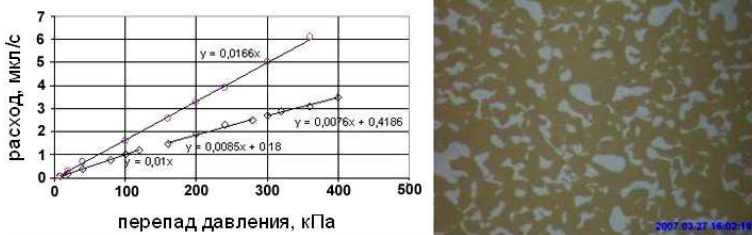


Рис. 7. Расход через микромодель переменного поперечного сечения от перепада давления. Вода (кружки), ромбы (полимерный раствор с концентрацией $2 \cdot 10^{-4}$). Фотография участка микромодели, заполненной нефтью (справа). Размер микромодели 2×4 см, глубина микроканалов 10 мкм

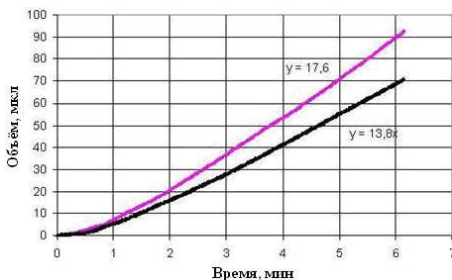


Рис. 8. Зависимость объема вытесняющей жидкости, прошедшей через микромодель от времени при перепаде давления 300 кПа. Вода дистиллированная (верхняя кривая), полимерный раствор (нижняя кривая) концентрации $2 \cdot 10^{-4}$

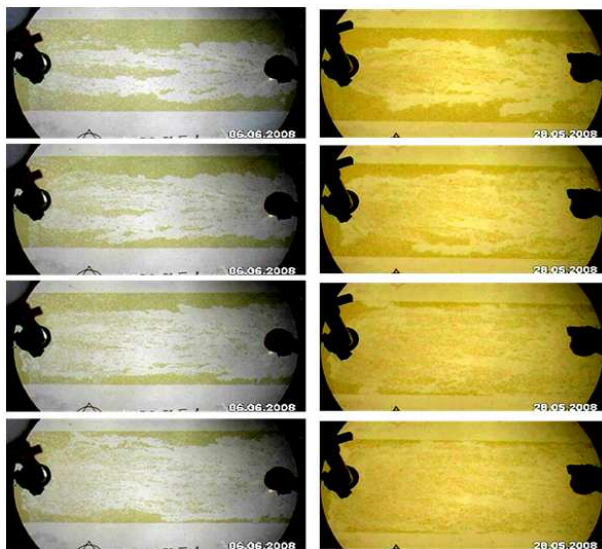


Рис. 9. Картины вытеснения при одинаковых объемах прошедшей вытесняющей жидкости (3, 6, 12, 18 мкл сверху вниз). Слева вода, справа полимерный раствор, объем пор микромоделю — 6 мкл

3. Заключение

Методы визуализации позволили выявить особенности проявления турбулентности в каналах переменного сечения при малых числах Re . В наших экспериментах использовался водный раствор полимера полиэтилен оксида концентрацией $c = 2 \cdot 10^{-4}$. Течение полимерного раствора в моделях поперечного кругового, квадратного, прямоугольного переменного сечений и в микромоделе показали возрастание гидравлического сопротивления по сравнению с водой. В традиционных реологических представлениях такое поведение не объясняется. Одним из возможных объяснений является проявление эластичной турбулентности. При этом происходит перемешивание, как говорилось выше, увеличение гидравлического сопротивления, а также пульсации — эти три фактора можно считать основными признаками турбулент-

ности. При сравнении структуры течения в каналах переменного сечения воды и полимерного раствора обнаруживаются пульсации с низкой частотой в районе 5–10 Гц при течении полимерного раствора. Пульсации и перемешивание наблюдались при добавлении в поток раствора краски синего цвета. Вполне возможно, их воздействие может привести к интенсификации вытеснения остаточной нефти. Сравнение вытеснения нефти из микромодели водой или полимерным раствором показывает, что вытеснение полимерным раствором более интенсивно при тех же объемах закачки. Предполагается, что для объемной трехмерной капиллярной структуры эффект будет больше. Следует отметить, что проявление эластичной турбулентности при закачивании полимерного раствора как бы эквивалентно внесению в поры порового пространства породы генераторов низкочастотных колебаний.

Список литературы

- [1] James D. F. and McLaren D. R. The laminar flow of dilute polymer solutions through porous media // *J.Fluid Mech.* 1975. 70. Pp. 733–752.
- [2] Калашников В.Н. Режимы турбулентных течений вязкоупругих жидкостей. Проблемы турбулентных течений. Наука, 1987. С. 163–171.
- [3] Калашников В.Н. Течение растворов полимеров по трубкам с переменным сечением. Москва. 1980. 50 с. (Препринт/ИПМ АН СССР, № 164)
- [4] Hachek E., Jane R.S. Die Viskositat von Ammoniumoleat-Lösungen. *Kolloid.* 1926. Z,38. 33–42.
- [5] Ostwald Wo., Auerbach R. Uber die Viscositat Kolloider Losungen im Struktur-Laminar-und Turbulenzgebiet. *Kolloid.* 1926. Z,38. 261–280.
- [6] Weissenberg K. Abnormal substances and abnormal phenomena of flow // *Proc. Inter. Congress on Rheol.* 1949. C. 1–29.
- [7] Groisman A., Enzelberger M, Quake S. Microfluidic Memory and Control Devices // *Science.* 2003. 300, 955–958.
- [8] Groisman A., Steinberg V. Elastic turbulence in curvilinear flows of polymer solutions // *New journal of Physics.* 2004. 29, 1–48.