

О ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ СЛАБОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРОВ В ТРУБОПРОВОДАХ

Рахматуллин Ш.И., Гареев М.М., Ким Д.П.

В последние годы в научных и инженерных кругах значительно возрос интерес к явлению снижения турбулентного трения в трубах путем введения в поток перекачиваемой жидкости незначительного количества полимерных добавок. Указанное явление, открытое почти полвека назад английским химиком Томсом [1], вызывает теоретический и практический интерес по следующим причинам. Во-первых, познание и разгадка механизма эффекта Томса – снижения гидравлического сопротивления турбулентных потоков приближает к пониманию процесса возникновения, генерации и диссипации турбулентности. Во-вторых, возможности решения энергосберегающих проблем в технологических процессах энергоемких объектов, в частности, транспортировки энергоносителей по магистральным трубопроводам.

Особенности механизма эффекта Томса определяют необходимость поиска связи между физико-химическими свойствами растворенных полимерных макромолекул и изменением гидродинамических характеристик турбулентного потока.

Как известно, свойствами полимеров, которые могут влиять на характеристики турбулентного потока и, следовательно, представлять интерес, в первую очередь являются молекулярная масса, конформация в растворе, гибкость молекулярной цепи, вязкоупругость макромолекулярных клубков и их ассоциатов. Понятно, что установление хотя бы корреляционной зависимости между физико-химическими свойствами растворенных полимерных макромолекул и изменением характеристик потока открывает путь к целенаправленному синтезу новых гидродинамически эффективных полимерных добавок.

Другим аспектом явления изменения параметров турбулентного потока путем введения полимерных добавок является познание той области чисел Рейнольдса турбулентного потока, для которых имеет место эффект Томса. До сих пор на практике в большинстве случаев при решении вопроса об использовании

противотурбулентных полимерных присадок необходимым и достаточным условием проявления эффекта Томса считалось наличие турбулентности в потоке.

Подобная точка зрения исходила из допущения, что присадка постоянно противостоит турбулентности в потоке жидкости, тем самым ламинизирует поток, превращая относительно плоский профиль скорости турбулентного потока в сечении трубы в более вытянутый в осевом направлении, постоянно приближая его к ламинарному-параболическому профилю.

При этом однозначно предполагается, что каждому профилю скорости соответствует своя величина коэффициента гидравлического сопротивления, расположенная в диапазоне

$$\frac{64}{Re} \leq \lambda_{np} \leq \begin{cases} \frac{0,3164}{Re^{0,25}} - \text{для зоны Блазиуса} \\ 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237} - \text{для развитого турбулентного течения} \end{cases}$$

Такое упрощение приводит к выводу о том, что снижение гидравлического сопротивления при вводе полимерных присадок имеет место всегда и при всех числах Рейнольдса, больших $Re_{кр} = 2300$, характеризующего переход ламинарного режима в турбулентный.

При этом считается, что максимально возможное снижение гидравлического сопротивления, имеющего место при полном подавлении турбулентности, для любого числа Рейнольдса больше критического ($Re_{кр} > 2300$) может быть спрогнозировано соотношением

$$\Delta\lambda_{max} = \lambda_{турб} - \lambda_{лам} = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} - \frac{64}{Re}.$$

Современные представления об эффекте Томса не ограничиваются необходимым условием проявления эффекта – турбулентностью потока, т.е. представлением эффекта Томса непрерывной зависимостью от числа Рейнольдса подобно той, что указано выше. В настоящее время общепризнанным фактом считается, что условие турбулентности потока является необходимым, но недостаточным условием проявления эффекта Томса. В частности, необходимым условием не указываются ограничения по характеристикам турбулентности (степени турбулентности, частоте турбулентных пульсаций, масштабу турбулентности), а также характеристикам используемого полимера, которые, по всей видимости, могут иметь место.

Исследования [2, 3] показывают, что между основными характеристиками турбулентности и числом Рейнольдса существует не только качественная, но и количественная связь. Так, степень турбулентности и частота турбулентных пульсаций могут быть выражены соотношениями

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{(u'^2 + v'^2 + \omega'^2)}{\bar{u}_{\max}^2}} = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}_{\max}} = 0,132 \cdot \text{Re}^{-0,125}, \quad (1)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\nu}{d^2} \cdot \text{Re}^{1,75}, \frac{1}{c}, \quad (2)$$

где u', v', ω' – пульсационные составляющие скорости по трём осям координат; \bar{u}_{\max} – скорость на оси трубы, $\sqrt{u'^2}$ – осреднённая по времени амплитуда пульсаций в потоке, $\text{Re} = \frac{u_{cp} \cdot d}{\nu}$ – число Рейнольдса, d – диаметр трубы, ν – кинематическая вязкость жидкости, T_0 – период времени существования вязкого слоя, по истечении которого период ламинарного течения сменяется интенсивным разрушением вязкого слоя в результате возникновения вблизи твёрдой поверхности турбулентных вихрей и выброса их в поток.

Было бы логично, по аналогии с критическим числом Рейнольдса $\text{Re}_{кр} = \frac{u \cdot d}{\nu} > 2300$ в трубе, характеризующим переход от ламинарного режима к турбулентному, предположить существования порогового значения числа Рейнольдса, при котором проявляется эффект Томса. Основанием для такого предположения может быть экспериментально установленный факт, согласно которому лишь при выполнении неравенства [4, 5]

$$\frac{u_*^2 \cdot \theta}{\nu} \geq 1 \quad (3)$$

возникает эффект Томса ($u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ – динамическая скорость, θ – время релаксации полимера, τ_w – напряжение сдвига на стенке трубы). Комбинация физических

величин $\frac{u_*^2 \cdot \theta}{\nu}$ носит безразмерный характер и предложена Ламли в качестве временного критерия для оценки наличия эффекта Томса [5].

Имея в виду соображения о взаимосвязи характеристик турбулентности и числа Рейнольдса, преобразуем условие (3) к виду, в котором в качестве достаточного критерия фигурировало бы число Рейнольдса. Для этого воспользуемся известным соотношением

$$\frac{u_{cp}}{u_*} = \left(\frac{8}{\lambda} \right)^{0,5} \quad (4)$$

u_{cp} – средняя скорость потока в трубе, λ – коэффициент гидравлического трения.

Полагая, что турбулентный режим в трубопроводе соответствует зоне Блазиуса, условие (3) с учётом (4) может быть преобразовано к виду

$$Re^{0,75} \geq \frac{l}{\theta} \cdot \frac{d}{u_{cp}} \cdot \frac{8}{0,3164} = 25,3 \cdot \frac{d}{u_{cp}} \cdot \frac{l}{\theta} \quad (5)$$

Время релаксации полимера может быть представлено выражением [6]

$$\theta = \frac{\eta \cdot M \cdot [\eta]}{RT}, \quad (6)$$

где η – динамическая вязкость раствора; M – молекулярная масса образца полимера; $[\eta]$ – характеристическая вязкость; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Подставив выражение (6) в неравенство (5), после несложных преобразований получим

$$Re_{nop} \geq \left[25,3 \cdot \frac{d^2}{\nu^2} \cdot \frac{RT}{\rho \cdot M} \cdot \frac{1}{[\eta]} \right]^{0,571} \quad (7)$$

Произведем численную оценку порогового числа Рейнольдса для следующих данных:

растворитель- нефть, $d=0,5$ м; $\nu=0,06 \cdot 10^{-4}$ м²/с

$$R = 8,31 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}}, T = 293 \text{ }^0\text{К}, \rho = 860 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, M = 3 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}},$$

$$[\eta] = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$\text{Re}_{\text{пор}} \geq \left[25,3 \cdot \frac{0,5^2}{(0,06 \cdot 10^{-4})^2} \cdot \frac{8,31 \cdot 10^3 \cdot 293}{860 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 0,6} \right]^{0,571} = 0,661 \cdot 10^5$$

Для образца полимера с молекулярной массой $M = 20 \cdot 10^6$ кг/кмоль получим

$$\text{Re}_{\text{пор}} = \left[25,3 \cdot \frac{0,5}{(0,06 \cdot 10^{-4})^2} \cdot \frac{8,31 \cdot 10^3 \cdot 293}{860 \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 0,6} \right]^{0,571} = 0,223 \cdot 10^5$$

В таблице 1 для заданных ранее условий ($d = 0,5$ м, $\nu = 6 \cdot 10^{-6}$ м²/с) приведены результаты расчёта турбулентных пульсаций при различных числах Рейнольдса:

Re	$0,1 \cdot 10^5$	$0,2 \cdot 10^5$	$0,223 \cdot 10^5$	$0,5 \cdot 10^5$	$0,661 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$
$\omega_0, 1/\text{с}$	0,058	0,194	0,235	0,963	1,571	3,242

Сопоставляя полученные пороговые значения чисел Рейнольдса с соответствующим им величинами турбулентных пульсаций, можно утверждать, что эффект Томса при вводе полимера заданной концентрации (определяет величину характеристической вязкости) может проявиться только в том случае, если величина турбулентных пульсаций будет превышать соответствующее значение, которое может быть рассчитано по формуле

$$\omega_{0\text{пор}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\nu}{d^2} \cdot \text{Re}_{\text{пор}}^{1,75} \quad (8)$$

Основной вывод изложенного заключается в том, что, пользуясь понятием порогового числа $\text{Re}_{\text{пор}}$ (формула (7)), можно:

- найти предельные числа Рейнольдса, для которых имеет место эффект Томса – снижение турбулентного трения в трубе;
- формулировать целенаправленные требования к синтезу противотурбулентной присадки (по молекулярной массе, характеристической вязкости) с учетом тех условий, в которых ее планируется применять.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Toms B.A. First Intern. Congress Rheol. Amsterdam: Nort Holland Publ. – 1949. – V.2. – 135 p.
- 2 Зарянкин А.Е., Барановский Б.В. О связи степени турбулентности с числом Рейнольдса. ИВУЗ, серия «Энергетика», №5, 1975, с. 144 – 147.
- 3 Марон В.И. О частоте турбулентных выбросов в сдвиговом течении. Транспорт и хранение нефтепродуктов. Научно – информационный сборник. Выпуск 3, М., 2001 г., с. 14 – 16.
- 4 Манжай В.Н., Илюшников А.В., Гареев М.Н., Несын Г.В. Лабораторные исследования и промышленные испытания полимерной добавки для снижения энергетических затрат на магистральном нефтепроводе. Инженерно – физический журнал, ноябрь, том 65, № 5, Минск, 1993, с. 515 – 517.
- 5 Пилипенко В.Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения. //Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР. Сер. Мех. жидкости и газа. – 1980, 15, с. 156 – 257.
6. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. - М.: Химия.-1977.- 438 с.