

ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ С ПОЛИМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Манжай В.Н., Абдусалямов А.В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии нефти
Сибирского отделения Российской академии наук (ИХН СО РАН, Томск, Россия)
mang@ipc.tsc.ru*

При перекачке жидких сред по трубопроводам в условиях низких температур происходит заметное увеличение энергетических затрат на перемещение единицы объема жидкости, что обусловлено экспоненциальным ростом вязкости перекачиваемой среды, а если ею является нефть, то ещё и парафинизацией внутренней стенки трубы, что сопровождается уменьшением площади поперечного сечения цилиндрического канала. Стандартными способами борьбы с этими двумя причинами снижения текучести углеводородных жидкостей обычно являются подогрев, разбавление маловязким растворителем и использование депрессорных присадок. Все эти методы эффективны при ламинарном режиме течения, но большинство нефтей и нефтепродуктов перекачиваются по магистральным нефтепроводам и продуктопроводам в турбулентном режиме [1, 2], скорость течения при котором в значительно меньшей степени зависит от вязкости жидкости и радиуса трубы. Например, уменьшение вязкости в два раза сопровождается ростом скорости ламинарного течения также в два раза, а при турбулентном режиме такое же уменьшение вязкости жидкости приводит к увеличению скорости всего лишь на десять процентов.

Поэтому в последнее время для интенсификации перекачки углеводородных жидкостей, активно используются противотурбулентные присадки на основе высокомолекулярных полимеров [3, 4]. Экспериментально установлено, что при введении полимера предельно малой концентрации (несколько грамм на тонну) в турбулентный поток жидкости в цилиндрическом канале происходит уменьшение коэффициента гидродинамического сопротивления (λ), входящего в уравнение Дарси-

Вейсбаха

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{4\pi^2 \cdot R_w^5} \cdot \rho \cdot Q^2 \quad (1)$$

и, в соответствие с уравнением (1), наблюдается либо увеличение объёмной скорости течения при заданном перепаде давления ($\Delta P = \text{const}$), либо уменьшение потерь давления на трение при постоянном объёмном расходе ($Q = \text{const}$).

Например, значения коэффициентов гидродинамического сопротивления маловязкой нефти Самотлорского месторождения (кинематическая вязкость $\nu = 5 \cdot 10^{-6}$ м²/с) и полимерных растворов ($\nu > 5 \cdot 10^{-6}$ м²/с) при ламинарном течении ложатся на общую теоретическую кривую Пуазейля $\lambda = 64/\text{Re}$, а зависимость коэффициентов сопротивления чистой нефти от числа Рейнольдса в области турбулентного течения аналитически описывается типичным для ньютоновских жидкостей эмпирическим уравнением $\lambda_s = 0,3164/\text{Re}^{0,25}$ и их значения укладываются на кривую Блазиуса (рис. 1, кривая 1), которая при тех же числах Рейнольдса расположена заметно выше коэффициентов сопротивления полимерных растворов (рис. 1, кривые 2 - 4). Из рисунка также видно, что коэффициенты гидродинамического сопротивления полимерных растворов тем меньше, чем выше их концентрация (С). Аналогичная картина наблюдается при турбулентном течении растворов всех высокомолекулярных полимеров.

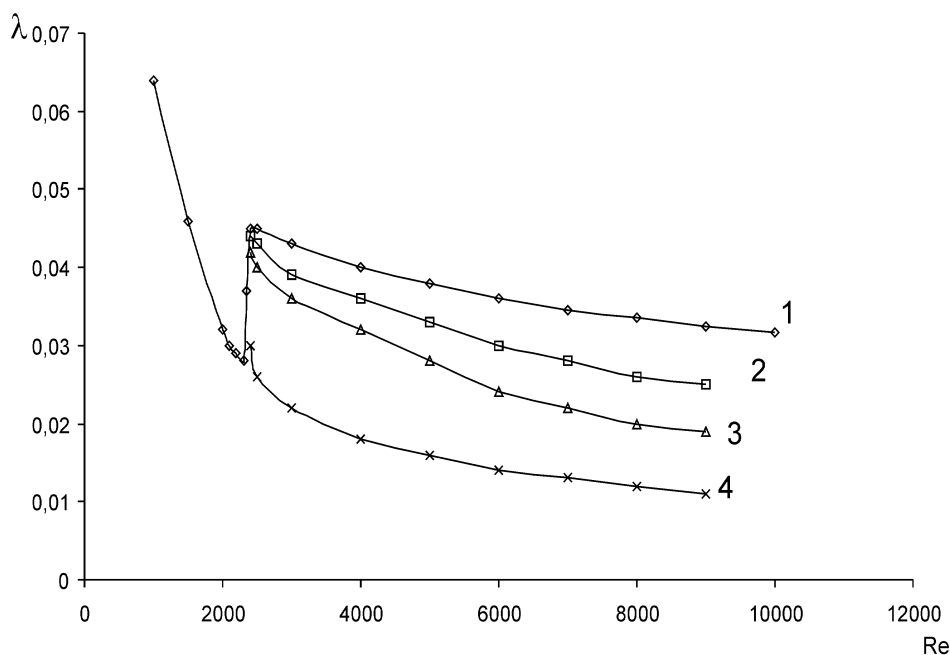


Рисунок 1. Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления раствора полиизопрена в нефти от числа Рейнольдса при различных концентрациях полимера: 1 – кривая Блазиуса для ньютоновских жидкостей (растворителей) $\lambda_{\text{тур.}} = 0,3164 / \text{Re}^{0,25}$. Концентрация растворов: 2 – $C = 0,05 \text{ кг/м}^3$; 3 – $C = 0,1 \text{ кг/м}^3$; 4 – $C = 0,5 \text{ кг/м}^3$

После подстановки в уравнение (1) значений коэффициентов гидродинамического сопротивления $\lambda_{\text{лам.}} = 64 / \text{Re}$ для ламинарного режима ($\text{Re} < 2300$), в которых число Рейнольдса рассчитывается по формуле $\text{Re} = 2Q / \pi \cdot R_w \cdot \nu$, можно получить формулу Пуазейля (2) для расчета объёмного расхода при ламинарном течении

$$Q_{\text{лам}} = \frac{\pi \cdot R_w^4}{8 \cdot \nu \cdot \rho \cdot L} \cdot \Delta P, \quad (2)$$

а для расчета объёмного расхода турбулентного течения ньютоновской жидкости уравнение Дарси-Вейсбаха с учетом $\lambda_{\text{тур.}} = 0,3164 / \text{Re}^{0,25}$ преобразуется в выражение

$$Q_{\text{тур}} = 14,8 \cdot \left(\frac{\Delta P}{L \cdot \rho} \right)^{0,571} \cdot \left(\frac{R_w^{2,714}}{\nu^{0,143}} \right) \quad (3)$$

где $Q = \pi R^2 \cdot \bar{U}$ – объёмный расход жидкости (объёмная скорость);

\bar{U} – среднерасходная скорость; $\Delta P = (P_2 - P_1)$ – потери давления на трение в трубе, длина которой (L) и радиус (R_w); ν – кинематическая вязкость; ρ – плотность жидкости

Таким образом, в соответствии с известными в гидродинамике уравнениями (2) и (3) увеличение вязкости жидкости, как при ламинарном, так и при турбулентном течении должно сопровождаться уменьшением объёмного расхода независимо от режима течения. Поэтому необычным явлением выглядит эффект Томса [5], который наблюдается при турбулентном режиме течения полимерных растворов. Парадоксальность эффекта заключается в том, что растворение полимера в жидкости приводит не только к росту её кинематической вязкости (таблица 1), но также к одновременному увеличению объёмной скорости турбулентного течения ($Q_{\text{турб.}}$), что противоречит формуле (3).

Таблица 1. Вязкость толуола и растворов полибутадиена в толуоле при разной температуре

$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$						
$C, \text{ кг/м}^3$	0,00	0,05	0,1	0,3	0,5	1,0
$T, \text{ К}$						
283	0,763	0,780	0,809	0,881	0,966	1,260
293	0,675	0,688	0,705	0,773	0,860	1,080
308	0,575	0,591	0,610	0,670	0,737	0,940
323	0,502	0,515	0,528	0,578	0,634	0,820

Как следует из таблицы 1, вязкость толуола и полимерных растворов различных концентраций при их охлаждении от температуры 323 К до 283 К возрастает примерно на одинаковую величину (~35 %), поэтому следовало бы ожидать уменьшения скорости течения этих жидкостей при понижении температуры. Действительно, если текучесть толуола заметно падает, то экспериментально измеренная скорость турбулентного течения растворов полимеров при тех же гидродинамических условиях увеличивается по сравнению со скоростью течения чистого растворителя. Это связано с уменьшением коэффициентов гидродинамического сопротивления полимерных растворов (λ_p) в области турбулентного режима течения при понижении температуры и это уменьшение тем заметнее, чем ниже температура (рис. 2). Следовательно, энергетически выгоднее транспортировать по трубопроводам охлажденные жидкости с введенными в них полимерными добавками.

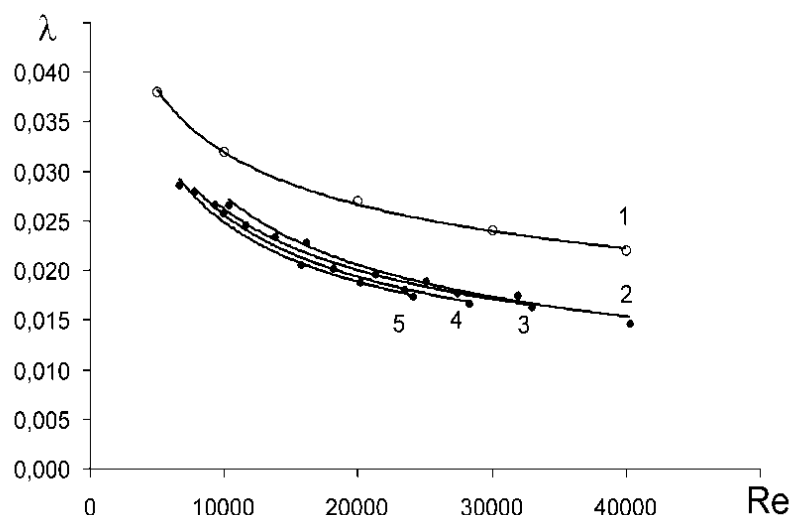


Рисунок 2. Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления (λ) от числа Рейнольдса: 1 – кривая Блазиуса для чистого растворителя $\lambda_{\text{тип}} = 0,3164 / \text{Re}^{0,25}$; раствор полибутадиена в толуоле ($C = 0,1 \text{ кг/м}^3$) при различных температурах: 2 – $T = 323 \text{ К}$; 3 – $T = 308 \text{ К}$; 4 – $T = 293 \text{ К}$; 5 – $T = 283 \text{ К}$.

При транспорте нефти с противотурбулентными добавками по магистральным трубопроводам происходит одновременное уменьшение потерь давления на трение и увеличение объёмного расхода [6, 7]. Поэтому суммарную величину эффекта снижения гидродинамического сопротивления (эффекта Томса), характеризующую уменьшение энергетических затрат ($DR, \%$) на перекачку полимерных растворов (p) по сравнению с исходным растворителем (s), рассчитывают по формуле

$$DR, \% = \frac{\lambda_s - \lambda_p}{\lambda_s} \cdot 100\% \quad (4)$$

Хотя формула (4) и позволяет после проведения эксперимента выполнить количественный расчет величины эффекта, но она не обладает прогностическим потенциалом. Она не отражает функциональной зависимости эффекта Томса от гидродинамических параметров течения и физико-химических характеристик полимерных растворов, в частности, в явном виде не показывает влияния температуры (T) на скорость течения полимерного раствора. Такая ситуация является следствием отсутствия общепринятого объяснения физической сути явления снижения гидродинамического сопротивления, поэтому различные исследователи по-разному трактуют эффект Томса. Наиболее обоснованными, на наш взгляд, являются представления, изложенные в работах [4, 9, 10] и учитывающие гидродинамические закономерности течения и физико-химические особенности полимерных растворов.

Согласно современным представлениям о структуре макромолекул в разбавленном растворе полимерные цепи хаотично свёрнуты в рыхлые клубки, во внутренних полостях которых иммобилизован растворитель. При этом свёрнутая макромолекула, заполнена (пропитана) частицами низкомолекулярного растворителя таким образом, что каждое мономерное звено цепи во внутреннем объёме клубка находится в окружении десятков и даже сотен сравнимых с ним по размерам молекул растворителя, поэтому плотность макромолекулярных клубков примерно равна плотности чистого (неиммобилизованного) растворителя. Равенство плотностей приводит к тому, что полимерные “капли” под действием броуновского движения равномерно распределены в объёме растворителя. Элементарные звенья макромолекулярных цепей и сольватирующие их частицы растворителя связаны силами межмолекулярного взаимодействия, вследствие чего полимерная цепь выполняет “армирующую” функцию микрофрагмента среды растворителя (макромолекулярного клубка), не позволяющую ему разрушаться под действием периодических деформаций, которым клубок подвергается в процессе сдвигового течения. Поэтому полимерные растворы обладают не только вязкими, но в отличие от ньютоновских жидкостей и упругими свойствами. Именно наличие упругих свойств у макромолекул, на наш взгляд, является физической причиной проявления эффекта Томса при турбулентном течении полимерных растворов.

Рассматривая движение макромолекулярных клубков вдоль оси потока под действием сдвигового напряжения при течении полимерного раствора как непрерывную последовательность деформаций-поворотов, приводящую к качению сферических тел (клубков) одного слоя по поверхности другого, можно получить выражение для расчета приращения объёмного расхода (ΔQ) полимерного раствора по сравнению с объёмным расходом чистого растворителя

$$\Delta Q = \pi R_w^2 \cdot \Psi \cdot \frac{\tau_w}{(\rho \cdot G)^{1/2}} \cdot \left[1 - \left(\frac{G}{\tau_w} \right)^{1/2} \right], \quad (5)$$

где $\Delta Q = Q_p - Q_s$ – величина приращения объёмного расхода полимерного раствора (Q_p) по сравнению с объёмным расходом растворителя (Q_s) при одинаковых значениях

напряжениях сдвига; $\tau_w = \frac{\Delta P}{2L} \cdot R_w$ – напряжение сдвига на стенке трубы, зависящее от заданного в эксперименте перепада давления (ΔP) в цилиндрическом канале, длина и радиус которого (L) и (R_w) соответственно; $\psi = \frac{[\eta] \cdot C}{1 + [\eta] \cdot C}$ – объёмная доля макромолекулярных клубков в растворе, зависящая от $[\eta]$ – характеристической вязкости и концентрации раствора (C); ρ – плотность растворителя; G – упругость макромолекулярного клубка с иммобилизованным растворителем.

Принципиально важным является появление в теоретически полученном выражении (5) новой величины, а именно величины упругости макромолекулярных клубков (G), которая отсутствует в других известных уравнениях, описывающих зависимость объёмного расхода от различных гидродинамических параметров течения и физико-химических характеристик жидкостей. Для ньютоновских жидкостей такими важными характеристиками являются плотность и вязкость, а упругость у них в типичных натурных экспериментах практически отсутствует, а для вязкоупругих сред (полимерные растворы) она играет существенную роль, следствием которой являются специфические свойства (эффект Томса). Упругость полимеров и их растворов в отличие от материалов их низкомолекулярных соединений уменьшается при понижении температуры, поэтому согласно уравнению (5) скорость течения полимерного раствора возрастает на величину ΔQ по сравнению с чистым растворителем.

Упругость растворов полимеров [11] кроме температуры (T) зависит также от концентрации (C) и молярной массы образца (M) и рассчитывается по формуле

$$G = \frac{C \cdot R \cdot T}{M}. \quad \text{Учитывая, что концентрация полимерного вещества в}$$

макромолекулярном клубке с иммобилизованным растворителем может быть представлена как отношение физической массы полимерной цепочки (μ) к объёму клубка $C = \mu / V_k = M / N_A \cdot V_k$, получим выражение для расчета упругости $G = kT / V_k$ индивидуального макромолекулярных клубков. Объём макромолекулярного клубка в свою очередь зависит от характеристической вязкости раствора ($[\eta]$, м³/кг) и молярной массы полимерного образца (M , кг/моль) и может быть вычислен по преобразованной формуле Флори-Фокса $V_k = [\eta] \cdot M / N_A$, в которой N_A - число Авагадро.

С учетом приведенных выше рассуждений и полученных формул уравнение (5) можно переписать в виде развернутого выражения, в котором присутствуют и гидродинамические параметры течения, и физико-химические характеристики полимерных растворов

$$\Delta Q = S \cdot \Psi \cdot \tau_w \cdot \left(\frac{M \cdot [\eta]}{\rho \cdot RT} \right)^{1/2} \cdot \left[1 - \left(\frac{RT}{\tau_w \cdot M \cdot [\eta]} \right)^{1/2} \right] \quad (6)$$

где $\Delta Q = Q_n - Q_p$ – приращение объёмного расхода полимерного раствора по сравнению с расходом растворителя; $S = \pi \cdot R_w^2$ – площадь поперечного сечения цилиндрического канала; $\Psi = [\eta] \cdot C_p / (1 + [\eta] \cdot C_p)$ – объёмная доля полимерных клубков в растворе, зависящая от характеристической вязкости $[\eta]$ и концентрации раствора полимера (C_p); $\tau_w = \Delta P \cdot R_w / 2L$ – напряжение сдвига на стенке трубы радиуса (R_w) и длины (L) при заданном перепаде давления (ΔP); M – молярная масса полимерного образца; ρ – плотность растворителя; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Из уравнения (6) следует, чем ниже температура полимерной жидкости, тем выше скорость её течения по сравнению с чистым растворителем. Анализ уравнения

также показывает, что оно полностью соответствует накопленным к настоящему времени эмпирическим данным и позволяет прогнозировать не только величину эффекта, но и условия его проявления. Экспериментально установлено, что эффект Томса наблюдается только в турбулентной области течения ($Re > 2300$) при напряжениях сдвига выше некоторого “порогового” (τ_{nop}), численное значение которого для каждого конкретного образца тем меньше, чем выше молярная масса полимера (M). Из уравнения (6) естественным образом следует, что проявление эффекта ($\Delta Q > 0$) можно ожидать только при выполнении необходимого условия $[1 - (RT / \tau_w \cdot M \cdot [\eta])^{1/2}] > 0$. После несложных преобразований последнего неравенства может быть найдено минимальное (пороговое) напряжение сдвига (7), выше которого скорость турбулентного течения полимерного раствора станет больше скорости течения растворителя

$$\tau_{nop} \approx \frac{RT}{M \cdot [\eta]} \quad (7)$$

Таким образом, пороговое напряжение сдвига для конкретного полимерного образца тем меньше, чем больше его молярная масса и характеристическая вязкость, а также чем ниже температура перекачиваемой жидкости с полимерной добавкой. Последний вывод является особенно важным в контексте проблемы, рассматриваемой в настоящей работе, т.е. противотурбулентные присадки на полимерной основе начнут эффективно снижать сопротивление при более низких напряжениях сдвига.

В условиях развитого турбулентного течения, т.е. при достаточно больших напряжениях сдвига на стенке (τ_w), когда алгебраическая сумма в квадратных скобках $[1 - (RT / \tau_w \cdot M \cdot [\eta])^{1/2}]$ стремится к единице, уравнение (6) упрощается и принимает вид

$$\Delta Q = \pi R_w^2 \cdot \psi \cdot \tau_w \cdot \left(\frac{M \cdot [\eta]}{\rho RT} \right)^{1/2} \quad (8)$$

или эквивалентный вид (9) последнего выражения в другой форме записи

$$\Delta Q = \pi R_w^2 \cdot \psi \cdot \tau_w \cdot \sqrt{\frac{V_k}{\rho \cdot kT}} \quad (9)$$

Следовательно, и приращение объёмного расхода полимерного раствора тем больше, чем ниже температура перекачиваемой жидкости с присадкой высокомолекулярного полимера.

Для экспериментальной проверки полученных выражений (5-10) и выводов, сделанных при их теоретическом анализе, а также для подтверждения возможности эффективности применения полимерных присадок в условиях отрицательных температур по шкале Цельсия, было проведено тестирование текучести растворителей и растворов полимеров в широком интервале температур, которое выполняли на турбулентном реометре [4, 12]. Лабораторный турбореометр конструктивно прост (рис. 3) и подобен капиллярному вискозиметру, но позволяет проводить исследования в большом диапазоне чисел Рейнольдса, охватывающем как ламинарную, так и турбулентную области течения. Основным рабочим элементом турбореометра является легко заменяемая толстостенная стеклянная трубка длиной (L) и радиусом (R_w). Верхний открытый конец трубки сообщается с рабочей камерой реометра, куда заливается исследуемая жидкость. Через другой конец, снабженный краном K_4 , жидкость имеет выход во внешнюю среду и далее попадает в приемник. С помощью газовой системы в реометре задаются различные перепады давления (ΔP), следовательно, и различные скорости течения жидкости через сменные цилиндрические каналы. Электронным секундомером фиксируется время истечения (t)

постоянного объема жидкости ($V = const$), затем рассчитывают объемный расход $Q = V/t$, а также напряжение сдвига на стенке канала $\tau_w = \Delta P \cdot R_w / 2L$, число Рейнольдса $Re = 2Q / \pi R_w \cdot \nu$ и другие параметры течения. Для предохранения от механических повреждений стеклянная трубка помещена в металлический кожух, находящийся в термостатируемой рубашке, в которую от термостата (криостата) подается теплоноситель. Таким образом, температурный интервал, в котором можно проводить исследования, определяется температурами кипения и застывания растворов, а также техническими возможностями термостата или криостата. Объектами исследования служили растворы нефтерастворимых карбоцепных полимеров (полиизопрен, полибутадиен и полигексен) в различных углеводородных жидкостях (нефть, бензин, толуол).

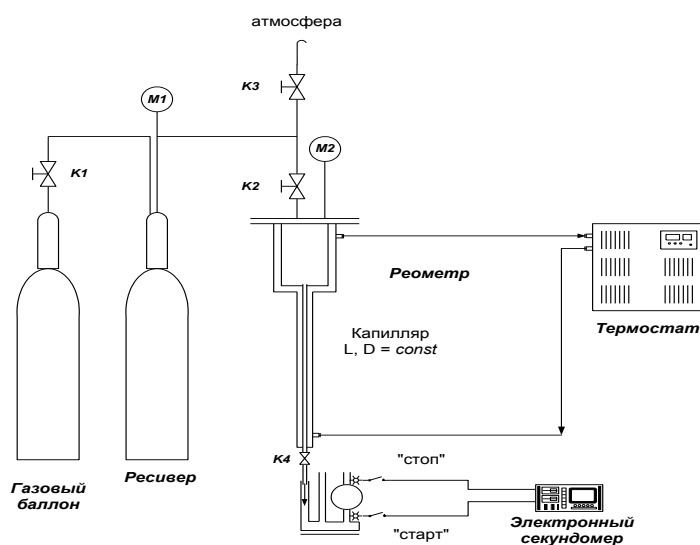


Рисунок 3. Лабораторный турбореометр.

Для сравнительной оценки противотурбулентных свойств той или иной полимерной добавки после опытов на лабораторном стенде в идентичных гидродинамических условиях обычно строят графические зависимости величины эффекта Томса (DR) от концентрации полимера (C) в растворе. В результате гидродинамического исследования различных полимеров (полиэтиленоксид, полиакриламид, полистирол, полиизопрен, полибутадиен, полиметакрилаты, полисилоксаны, поли- α -олефины и др.) установлено [4], что величина DR при увеличении содержания добавки вначале возрастает практически по линейному закону (рис. 4), достигает максимального значения (DR_{MAX}) при некоторой оптимальной концентрации ($C_{ОПТ.}$) и при дальнейшем увеличении концентрации полимера величина эффекта медленно уменьшается. Таким образом, для всех полимеров независимо от их химической природы концентрационные кривые эффекта являются кривыми не с насыщением, а кривыми с экстремумом. Наиболее эффективными считаются полимерные образцы, имеющие наибольшие величины DR_{MAX} при наименьших значениях $C_{ОПТ.}$

Величина эффекта снижения сопротивления (DR) и приращение объемного расхода (ΔQ) функционально связаны уравнением

$$DR, \% = \left[1 - \frac{Q_s^2}{(Q_s + \Delta Q)^2} \right] \cdot 100\%, \quad (10)$$

поэтому и на кривых зависимости $\Delta Q = f(C)$ также наблюдается экстремум (рис. 4) при той же оптимальной концентрации ($C_{\text{опт}}$), что и на кривых $DR = f(C)$.

Анализ уравнения (9) предсказывает, что при уменьшении размеров макромолекулярного клубка (V_k) приращение объёмного расхода (ΔQ) и, соответственно, величина эффекта (DR) будут уменьшаться. Объём клубка с иммобилизованным растворителем может быть рассчитан упомянутой выше преобразованной формуле Флори-Фокса $V_k \approx M \cdot [\eta] / N_A$, т.е. он зависит от молярной массы образца и от характеристической вязкости полимерных растворов. Поэтому при изменении термодинамического качества растворителя (численное значение $[\eta]$ зависит от химической природы и компонентного состава жидкой среды, а также её температуры) в соответствии с уравнениями (9) и (10) будут также изменяться величины эффекта и оптимальной концентрации одного и того же образца полимера (рис. 4, кривые 2 и 3).

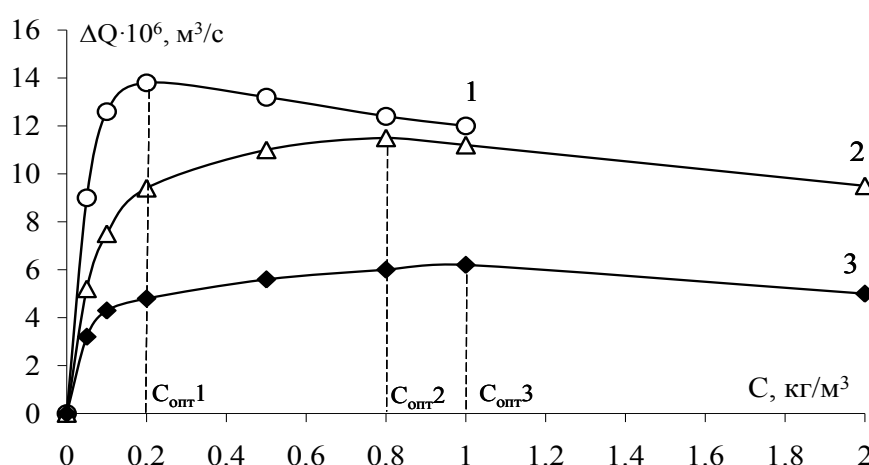


Рисунок 4. Зависимость приращения объёмного расхода от концентрации полимеров при напряжении сдвига на стенке цилиндрического канала:

- 1 – раствор полибутадиена в толуоле ($M_r = 1,21 \cdot 10^6$; $[\eta] = 0,85$ м³/кг; $C_{\text{опт.1}} = 0,2$ кг/м³);
- 2 – раствор полиизопрена в толуоле ($M_r = 0,55 \cdot 10^6$; $[\eta] = 0,53$ м³/кг; $C_{\text{опт.2}} = 0,8$ кг/м³);
- 3 – раствор полиизопрена в нефти ($M_r = 0,55 \cdot 10^6$; $[\eta] = 0,45$ м³/кг; $C_{\text{опт.3}} = 1,0$ кг/м³)

Противотурбулентные присадки начали широко использовать в конце 20-го века для перекачки нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам. На начальной стадии применения антитурбулентных присадок [13, 14] в энергосберегающих технологиях трубопроводного транспорта жидкостей (вода и нефть) чаще всего использовали водорастворимый полиакриламид (ПАА) и нефтерастворимые поли- α -олефины, например, полигексен. После промышленного синтеза этих полимеров в растворителе получают полимеризат с очень высокой вязкостью и малым содержанием полимерного вещества (до 10% масс.). Такие системы называются присадками растворного типа, которые из-за малого содержания в них гидродинамически активного вещества малорентабельны, поэтому в настоящее время более перспективными являются присадки коллоидной формы с содержанием полимера ~30%. Антитурбулентные присадки суспензионно-эмульсионной консистенции состоят из дисперсной фазы на основе сверхвысокомолекулярных полимеров ($M_r > 1 \cdot 10^6$) высокой степени диспергирования и жидкой дисперсионной

среды, которая должна обладать оптимальными физико-химическими и реологическими свойствами.

К присадкам нового поколения предъявляются следующие экономические и технологически обоснованные требования: а) они должны иметь относительно невысокую себестоимость; б) обладать хорошей растворимостью в жидкостях, транспортируемых по трубопроводам; в) не оказывать негативного влияния на окружающую среду и на последующие технологические процессы переработки сырья.

Из ряда противотурбулентных присадок (ПТП) импортного производства (*Baker*, *Necadd*, *X-Pand* и *LiquidPower*), исследованных при комнатной температуре, наилучшей эффективностью обладает *Baker*, которую наряду с отечественной присадкой *esm-68* подвергли реологическому и гидродинамическому тестированию при более низких температурах. Основу дисперсной (полимерной) фазы обоих присадок составлял полигексен с очень высокой молекулярной массой ($M_w \approx 5 \cdot 10^6$), установленной методом гель-проникающей хроматографии (рис. 5).

Важнейшей реологической характеристикой полимерных материалов, обладающих высокоэластичными свойствами и используемых в условиях предельно низких температур, является величина температуры их стеклования. Установили, что синтезированный в лаборатории полигексен *esm-68* и полимер импортной присадки *Baker*, не теряют высокоэластичных свойств до температуры -50°C (223 K). Для практического использования противотурбулентной присадки суспензионного типа в арктических условиях требуется не только отсутствие стеклования полимера дисперсной фазы, но и дисперсионная среда не должна застывать в широком диапазоне температур, поэтому были проведены исследования её вязких свойств при различных скоростях сдвига (рис. 6). Установлено, что у присадки хотя и появляются в области низких температур неньютоновскими свойствами, но она и в ней не теряет текучести.

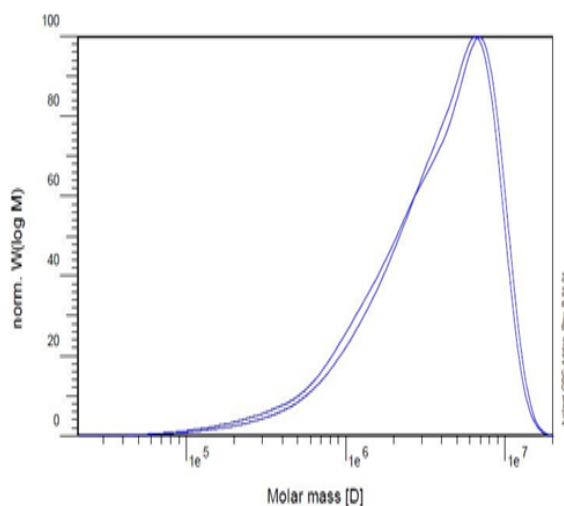


Рисунок 5. Молекулярно-массовое распределение образца *esm-68*

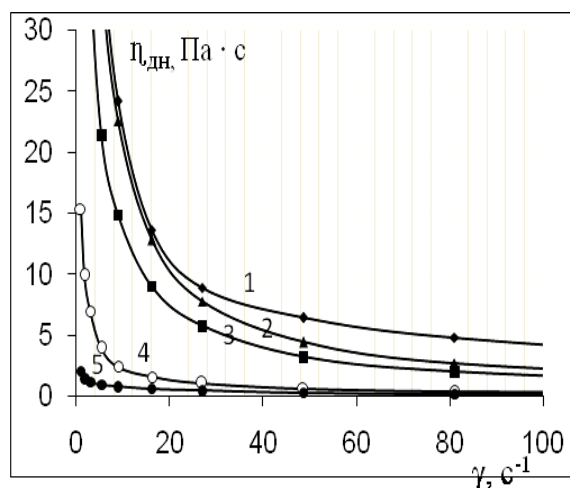


Рисунок 6. Зависимость динамической вязкости от скорости сдвига коллоидной присадки *Baker* при различных температурах: 1) -20°C ; 2) -5°C ; 3) $+5^\circ\text{C}$; 4) $+25^\circ\text{C}$; 5) $+40^\circ\text{C}$

На турбулентном реометре при низких температурах были проведены исследования противотурбулентных свойств бензиновых растворов присадок *Baker* и *esm-68* различных концентраций. Лабораторные эксперименты выполнены в интервале напряжений сдвига от 4 Па до 10 Па, т.е. в диапазоне, типичном для эксплуатационных режимов работы магистральных трубопроводов. Бензин из-за малого значения его кинематической вязкости использовали в качестве углеводородной жидкости для того, чтобы при значениях напряжений сдвига, реализуемых в турбореометре, близких к имеющимся в промышленных трубопроводах, моделировать ещё и уровень турбулентности, сравнимый с реально существующим в трубопроводах. Полученные результаты в виде концентрационных зависимостей величины эффекта представлены на рисунках 7 и 8.

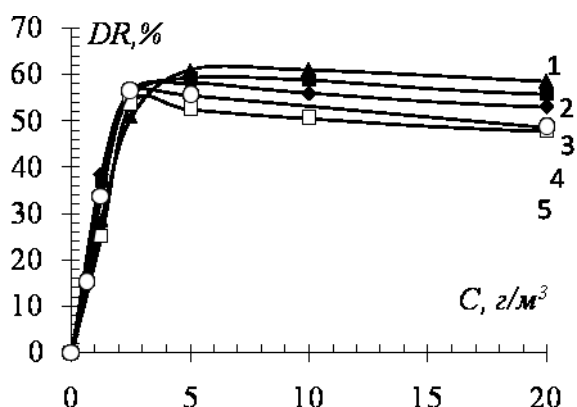


Рисунок 7. Зависимость величины эффекта (DR, %) от концентрации присадки Baker при различных температурах: 1) +40 °C; 2) +25 °C; 3) +5 °C; 4) -5 °C; 5) -15 °C

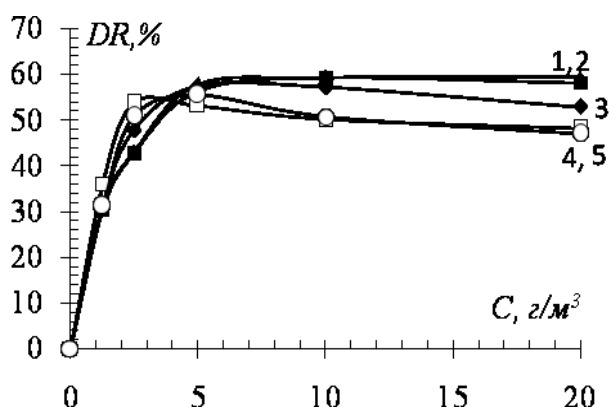


Рисунок 8. Зависимость величины эффекта (DR, %) от концентрации присадки esm-68 при различных температурах: 1) +40 °C; 2) +25 °C; 3) +5 °C; 4) -5 °C; 5) -15 °C

Анализ рисунков свидетельствует, что при понижении температуры величина максимального эффекта (~60%) практически не изменяется. Величина оптимальной концентрации присадок из диапазона ($C_{опт.} \approx 5 - 10 \text{ г/м}^3$) при температуре +40 °C смещается в интервал более низких значений ($C_{опт.} < 5 \text{ г/м}^3$) при отрицательных температурах, что и предсказывается уравнениями (6) и (7). Таким образом, уменьшение концентрации противотурбулентной добавки, при которой достигается максимальная величина эффекта, повысит экономическую рентабельность использования энергосберегающей технологии трубопроводного транспорта углеводородных жидкостей в арктических областях.

Выводы

1. Использование противотурбулентных присадок на полимерной основе для интенсификации турбулентного течения углеводородных жидкостей в арктических условиях (при низких температурах) технологически целесообразно и по своей эффективности не уступает использованию их в обычных («тепличных») условиях.
2. Из всех изученных противотурбулентных присадок зарубежного производства наибольшей эффективностью обладает присадка Baker.
3. В нашей стране имеются технологические возможности для получения высокоэффективных противотурбулентных присадок отечественного производства, которые после незначительной модификации могут выпускаться в коллоидной форме с повышенным содержанием гидродинамически полезного (полимерного) вещества.

Список литературы

1. В.Б. Галеев, М.З. Карпачев, В.И. Храменко. *Магистральные нефтепродуктопроводы*, 1986, 256 с.
2. Р.А. Алиев, В.Д. Белоусов, А.Г. Немудров и др. *Трубопроводный транспорт нефти и газа*, 1988, 368 с.
3. Ю.П. Белоусов. *Противотурбулентные присадки для углеводородных жидкостей*, 1986, 144 с.
4. М.М. Гареев, Ю.В. Лисин, В.Н. Манжай и др. *Противотурбулентные присадки для снижения гидравлического сопротивления трубопроводов*, 2013, 228 с.
5. Toms B. A. *Proceeding International Congress on Rheology*, 1949, **Vol. 2**, 135–141.
6. М.М. Гареев, Г.В. Несын, В.Н. Манжай. *Нефтяное хозяйство*, 1992, **№10**, 30–31.
7. В.Н. Манжай, А.В. Илюшников, М.М. Гареев и др. *Инженерно-физический журнал*, 1993, **Т.65**, 515–517.
8. Г.В. Несын, В.Н. Манжай, Е.А. Попов и др. *Трубопроводный транспорт*, 1993, **№4**, 28–30.
9. V.N. Manzhai. *Collected Papers of SB of Russian Academy of Sciences: Part III, "theoretic and Applied Principles of Physicochemical Properties Control of Petroleum Systems"*, 2001, 71–81.
10. V.N. Manzhai, Y.R.Nasibulina, A.S.Kuchevskaya, A.G.Filimoshkin. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2014, **№ 80**, 38–42.
11. Г.В. Виноградов, А.Я. Малкин. *Реология полимеров*, 1977, 438 с.
12. Г.В. Несын, В.Н. Манжай, Ю.В. Сулейманова и др. *Высокомолекулярные соединения*, 2012, **Т.54, №1**, 65 – 72.
13. Смолл С.Р. Добавки, снижающие сопротивление течения в трубопроводах. Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. 1983, **№6**, 58–60.
14. Мут Ч., Монахен М., Песето Л. Применение специальных присадок с целью снижения затрат по эксплуатации трубопроводов// Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. 1986, **№7**, 60–62.