

УДК 532.529.5:678.745.842

ВЛИЯНИЕ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПРИСАДОК И ПАВ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ЭНЕРГОЗАТРАТЫ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ВОДОНЕФТЯНЫХ СИСТЕМ

С. В. Чичканов, А. И. Шамсуллин, В. А. Мягченков

Казанский государственный технологический университет

Проведена оценка эффективности водорастворимых сополимеров акриламида в качестве присадок, снижающих гидравлическое сопротивление при турбулентном течении водных и водонефтяных сред (на примере прямых нефтяных эмульсий). Проанализированы реологические и энергетические аспекты турбулентного течения при совместном введении в водонефтяные потоки полимеров и поверхностно-активных веществ различной природы. Установлено, что введение полимерных присадок в турбулентные водонефтяные потоки приводит к повышению интенсивности массопереноса расхода жидкостей без существенного увеличения количества электроэнергии, потребляемой насосной установкой. Проанализировано влияние молекулярной массы присадки на удельные энергозатраты при транспортировке турбулентных водонефтяных потоков.

Способ снижения гидравлического сопротивления турбулентных потоков жидкостей путём введения небольших доз полимерных присадок (эффект Томса) нашёл применение в промышленном масштабе при скоростной транспортировке по магистральным и нефтепромысловым трубопроводам водных, водонефтяных и нефтяных сред [1]. На реальных объектах трубопроводного транспорта позитивные эффекты при введении полимерных присадок в турбулентные потоки жидкостей могут проявляться по разным направлениям, связанным как с увеличением расходов жидкостей при условии поддержания постоянного давления в трубопроводе и нагрузки на приводы перекачивающих агрегатов, так и со снижением давления в трубопроводе при условии постоянства расхода жидкости, а также со снижением нагрузки на приводы перекачивающих агрегатов [2]. Большинство технологических процессов скоростной транспортировки жидкостей осуществлены в режиме постоянства давления в трубопроводе, и в этом случае положительное влияние полимерной присадки может

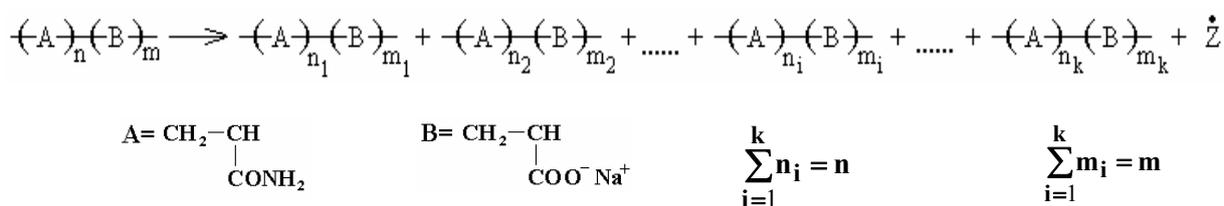
проявляться не только в увеличении скорости массопереноса жидкостей, но и в изменении нагрузки на приводы насосных систем, а, следовательно, и на количество потребляемой ими электроэнергии.

Известно, что при введении в ламинарные потоки даже небольших количеств высокомолекулярных соединений происходит значительное увеличение вязкости среды и прямо пропорционально вязкости растёт гидравлическое сопротивление ламинарного потока жидкости, а следовательно и энергетические затраты на её транспортировку в ламинарном режиме течения [3]. Совершенно иные функции полимерной присадки проявляются в турбулентных потоках. В присутствии полимерной присадки (при концентрациях не более 0,01-0,02 % масс.) гидравлическое сопротивление турбулентного потока оказывается меньше, чем растворителя, вследствие чего при прочих неизменных условиях расход жидкости увеличивается. Проводя аналогию с ламинарными потоками встаёт вполне резонный вопрос – в какой мере увеличение скорости транспортировки жидкостей в турбулентном режиме при введении полимерных присадок связано с величиной энергозатрат для достижения этого? Аргументировано и правильно ответить на этот вопрос можно лишь при условии одновременного контроля двух основных (с технологической точки зрения) параметров турбулентного потока, а именно, расхода жидкости и энергозатрат на её транспортировку. Именно такой более углубленный уровень оценки закономерностей в турбулентных потоках в присутствии водорастворимых полимерных присадок и был осуществлён в данной работе. Об актуальности исследований в этом направлении можно судить хотя бы и по тому, что насосные станции работают в круглосуточном режиме и поэтому, даже небольшое снижение удельных энергозатрат при скоростной транспортировке жидкостей может оказаться существенным фактором в уменьшении себестоимости перекачиваемых по трубопроводам продуктов. С учётом огромного объёма транспортируемых по трубопроводам жидкостей последнее обстоятельство становится всё более значимым по причине растущего дефицита и постоянного увеличения стоимости электроэнергии.

В данной работе на количественном уровне проведена оценка эффективности водорастворимых сополимеров акриламида в качестве присадок, способствующих увеличению

расхода жидкости и снижению количества потребляемой электроэнергии при турбулентном течении водных и водонефтяных сред.

В качестве перекачиваемых сред использовали дистиллированную воду и 10 % прямые эмульсии нефти. Полимерными присадками служили высокомолекулярные образцы анионных сополимеров акриламида, различающиеся между собой по величине молекулярной массы. Идентичность образцов по химической структуре и содержанию ионогенных групп было обеспечено самим способом их получения, а именно, по методу ультразвуковой деструкции в мягком режиме исходного (высокомолекулярного) образца сополимера. Доказательством последнего утверждения может служить упрощённая схема УЗД макромолекул сополимеров [4]:



Здесь $\dot{\text{Z}}$ - неактивные в отношении разрыва скелетных углерод-углеродных связей макромолекул радикалы, природа которых несущественна при анализе брутто-закономерностей процесса УЗД. Для проведения процесса деструкции в качестве исходного образца использовали статистический сополимер акриламида с акрилатом натрия с молекулярной массой $M=1,6 \cdot 10^6$ и содержанием ионогенных (акрилатных) групп 17,5 % мол. Процесс ультразвуковой деструкции сополимеров проводили на приборе УЗДН-1 при частоте 22 кГц в 0,2 % водном растворе при варьировании мощности ультразвукового поля и времени озвучивания [5]. Молекулярные массы M полученных образцов подсчитывали по уравнению Штаудингера – Марка – Хаувинка:

$$[\eta] = K \cdot M^a,$$

где K и a – константы ($K=0,0062$, $a=0,81$) [6]. Значения предельных чисел вязкости $[\eta]$ определяли экстраполяцией зависимостей $\eta_{\text{уд}}/C=f(C)$ в 0,5 Н растворе NaCl к $C=0$ (рис. 1).

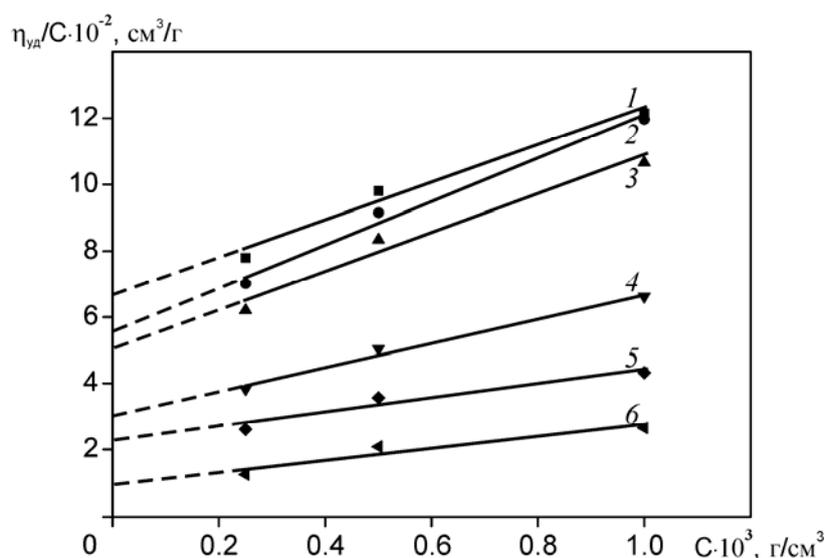


Рис.1 – Зависимость чисел вязкости η_{sp}/C от концентрации анионных сополимеров акриламида C в 0,5 N растворе $NaCl$

Обобщённые данные по режиму процесса УЗД и молекулярным массам полученных образцов сополимеров представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные по режимам ультразвуковой обработки растворов и молекулярным массам полученных образцов сополимеров

Образец	Время обработки, мин.	Мощность излучения, Вт/см ²	$[\eta]$, см ³ /г	$M \cdot 10^{-6}$
1	-	-	662,2	1,61
2	5	1,0	561,1	1,32
3	5	4,0	504,6	1,15
4	6,5	7,9	303,9	0,62
5	7	11,8	223,3	0,42
6	8	15,2	96,7	0,15

Для достижения одновременного контроля за реологическими и энергетическими параметрами при турбулентном режиме течения жидкостей нами была создана и апробирована насосная установка циркуляционного типа (рис. 2). При выборе конструкции установки приоритет был отдан замкнутому типу рабочего контура из-за удобства проведения и обработки данных эксперимента, а также потенциальной возможности оценки деструктивных процессов при длительной работе установки. Её отличительной особенностью является универсальность: она позволяет получать дисперсные системы типа прямых и обратных

эмульсий (I Блок) и исследовать реологические и энергетические параметры турбулентных потоков (II Блок). Для получения прямых эмульсий нефти в ёмкость 8 вводили расчётные количества воды, нефти и стабилизатора (Неонол АФ₉-10) и при включённом насосе 1 осуществляли циркуляцию смеси по малому контуру через блок сетчатых мембран 2 для дробления частиц дисперсной фазы (нефти). Такой способ получения прямых эмульсий нефти гарантировал их высокую агрегативную и седиментационную устойчивость в течение последующих экспериментов. Через фиксированный промежуток времени насос 1 отключался.

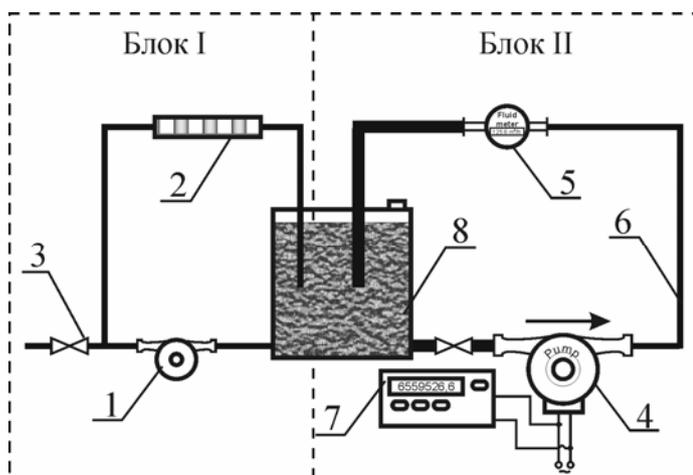


Рис.2 – Принципиальная схема установки для получения эмульсий (Блок I) и изучения гидродинамических и энергетических параметров турбулентных потоков (Блок II). 1 – насос для получения эмульсий; 2 – блок сетчатых мембран; 3 – кран для слива отработанной эмульсии; 4 – центробежный насос; 5 – расходомер; 6 – рабочий трубопровод; 7 – счётчик электроэнергии; 8 – ёмкость с анализируемой жидкостью.

Для изучения реологических свойств жидкостей и энергетических параметров турбулентных потоков использовался II Блок. С этой целью включали насос 4 и осуществляли циркуляцию жидкости через контрольный трубопровод диаметром 12 мм и длиной 15 м, выполненный из армированного полиэтилена. С помощью расходомера 5 контролировали расход жидкости и количество электроэнергии, потреблённой насосом (счётчик 7). Мощность используемого насоса обеспечивала развитый турбулентный режим течения жидкостей в трубопроводе (число Рейнольдса по воде для всех экспериментов было не менее $15 \cdot 10^3$).

В качестве энергетической характеристики процесса использовали долю сэкономленной электроэнергии ψ :

$$\psi = \frac{E_0 - E}{E},$$

где E и E_0 – энергопотребление насоса (размерность – кВт·ч/м³) в расчёте на циркуляцию по трубопроводу единичного объёма (1 м³) жидкости, соответственно, с добавкой полимера и без него.

На первом этапе нами были проведены эксперименты по оценке энергетических параметров турбулентных потоков в водных средах и прямых эмульсиях нефти при варьировании концентрации и молекулярной массы полимерной присадки (рис. 3).

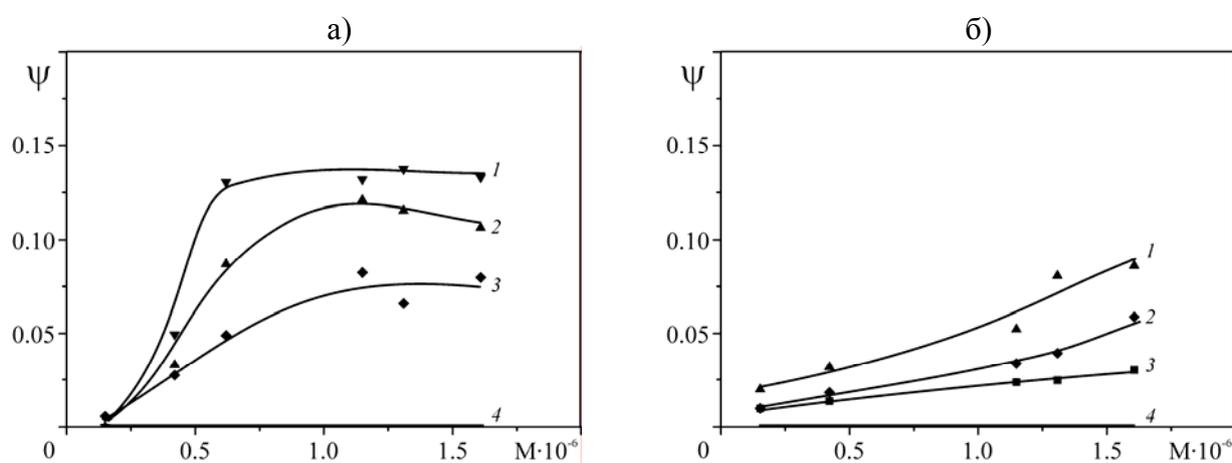


Рис. 3 – Зависимость доли сэкономленной электроэнергии ψ от молекулярной массы анионных сополимеров в водной среде (а) и в 10 % прямой эмульсии нефти (б)
Концентрация сополимеров C , кг/м³: 1 – 0,05; 2 – 0,025; 3 – 0,01; 4 – 0

По данным рис. 3 можно отметить, что доля сэкономленной электроэнергии для всех изученных C и M сополимеров как в водной, так и в водонефтяной средах меньше единицы. Из этого можно сделать принципиально важный вывод о том, что повышение расхода жидкости при введении полимерной присадки не связано с увеличением количества потребляемой насосом электроэнергии.

Довольно чётко прослеживается зависимость параметра ψ от молекулярной массы – чем выше M сополимера, тем больше ψ , а значит и способность присадки снижать энергозатраты при транспортировке жидкости в турбулентном режиме [7]. Следует отметить и тот факт, что в случае водных сред при достижении определённого значения M (вблизи $6 \cdot 10^5$) эффективность полимерной присадки перестаёт расти и значения ψ стабилизируются. По аналогии с

«запределением» величины эффекта Томса T после достижения $M_{кр}$ [1] такой характер зависимости $\psi=f(M)$ можно связать со спецификой конформационного состояния макромолекул в пристеночной зоны потока.

По данным рис. 3 можно также отметить, что для фиксированных значений C и M величины параметра ψ в случае прямых эмульсий нефти меньше аналогичных показателей для чисто водных сред. Снижение эффективности полимерной присадки в нефтяной эмульсии связано, вероятнее всего, с процессами частичной адсорбции макромолекул полимерной присадки на частицах дисперсной фазы, что приводит к уменьшению эффективной («рабочей») концентрации полимера в дисперсионной среде [8, 9].

Для оценки стабильности эффекта снижения энергопотребления в ходе процесса транспортировки водонефтяных систем параметр ψ определялся при различных кратностях циркуляции N жидкости по замкнутому контуру после введения полимерной присадки. О наличии отчётливо выраженной корреляции (а именно, симбатности) между зависимостями $\psi=f(N)$ и $T=f(N)$ можно судить по данным рис. 4.

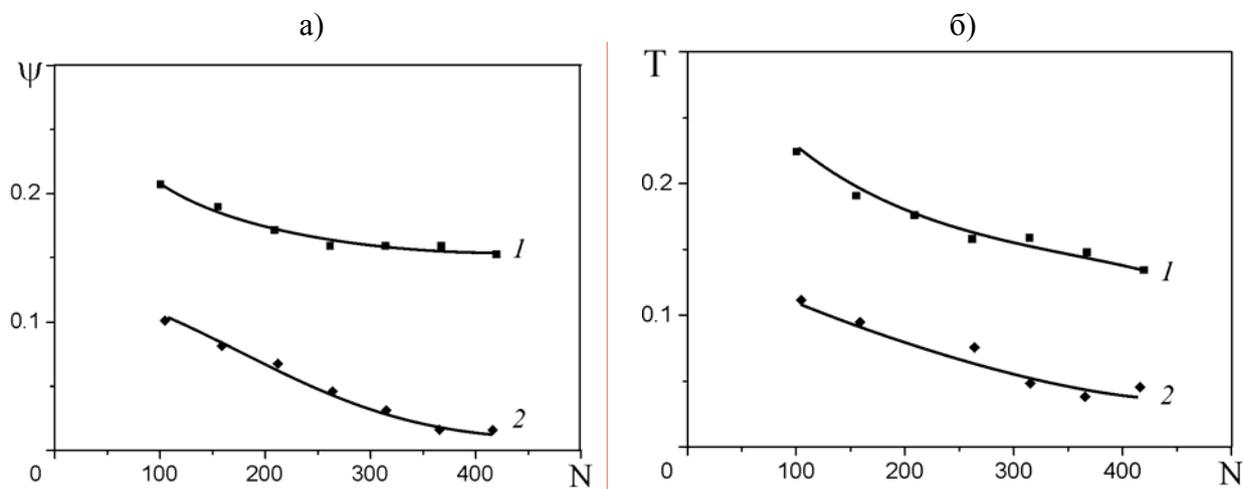


Рис. 4 – Зависимость доли сэкономленной электроэнергии ψ (а) и величины эффекта Томса T (б) от кратности циркуляции дистиллированной воды (1) и прямой эмульсии нефти (2)

Рис. 4 служит дополнительным подтверждением того обстоятельства, что увеличение расхода жидкости при добавлении в турбулентный поток полимерной присадки не приводит к

увеличению энергозатрат, а наоборот, свидетельствует о параллельной экономии электроэнергии, поскольку оба параметра (ψ и T) больше 0.

По экспериментальным данным рис. 4 следует отметить и то, что в водных средах и прямых эмульсиях нефти наблюдается некоторое снижение параметров ψ и T по мере увеличения кратности циркуляции N (а значит и времени транспортировки жидкостей по замкнутому контуру). Это свидетельствует о том, что полимерная присадка в турбулентном потоке подвергается частичной механической деструкции, и как следствие этого, снижается её эффективность. При этом необходимо иметь в виду, что в отличие от реальных трубопроводов в наших экспериментах анализируемые водонефтяные системы совершают сотни циклов, связанных с прохождением их через насос, в котором наиболее высока вероятность механодеструкции макромолекул [10].

Ранее, с использованием турбулентного реометра нами проведены исследования по влиянию ПАВ на величину эффекта Томса как в водных средах, так и в прямых эмульсиях нефти [1, 11]. Дело в том, что при использовании полимерных присадок для снижения гидравлического сопротивления турбулентных потоков необходимо принимать во внимание, что реальные жидкости, транспортируемые по трубопроводу, представляют собой сложные, многокомпонентные системы, отдельные ингредиенты которых могут оказывать существенное влияние на эффективность полимерной присадки [11]. Поскольку на нефтяных месторождениях поверхностно-активные вещества (ПАВ) применяются практически на каждой стадии нефтедобычи, то именно эта группа веществ и была выбрана в качестве ещё одного (помимо полимерной присадки) потенциально активного компонента, способного оказать влияние на энергетику процесса транспортировки.

Нами было установлено, что природа ПАВ оказывает сильное влияние на эффективность полимерной присадки. Например, добавление анионного сополимера в турбулентный поток жидкости, содержащей катионное ПАВ приводит к резкому снижению величины эффекта Томса. Анионное и неионогенное ПАВ, напротив, практически не оказывали негативного действия на эффективность анионного сополимера акриламида, а в ряде случаев проявляли слабый эффект синергизма. Причина проявления этих эффектов в бинарных композициях

полимер-ПАВ, вероятнее всего, связана с сильным влиянием ПАВ на конформационное состояние макромолекул сополимеров, особенно в пристеночной зоне потока. Особенно ярко это проявляется в случае композиций, содержащих разноимённо заряженные ионы ПАВ и макроионы [11]. В связи с этим, возникает вопрос, в какой мере сохранятся отмеченные закономерности при анализе энергетических оценочных параметров типа доли сэкономленной электроэнергии ψ ?

С этой целью нами была проведена специальная серия экспериментов по снижению энергопотребления при транспортировке жидкостей в турбулентном режиме в присутствии анионного сополимера акриламида марки DP9-8177 и ПАВ различной природы – анионного (Сурфаген), катионного (Катапав) и неионогенного (Неонол АФ₉-10). Концентрации полимера и ПАВ в этих опытах поддерживались постоянными, и составили 0,01% и 0,1%, соответственно.

По данным рис. 5 можно сделать вполне определённое суждение на поставленный вопрос – при добавлении в турбулентный поток бинарных композиций анионный сополимер-анионное ПАВ и анионный сополимер-неионогенное ПАВ величины параметра ψ остаются приблизительно на том же уровне, что и для сополимера в отсутствие добавок ПАВ.

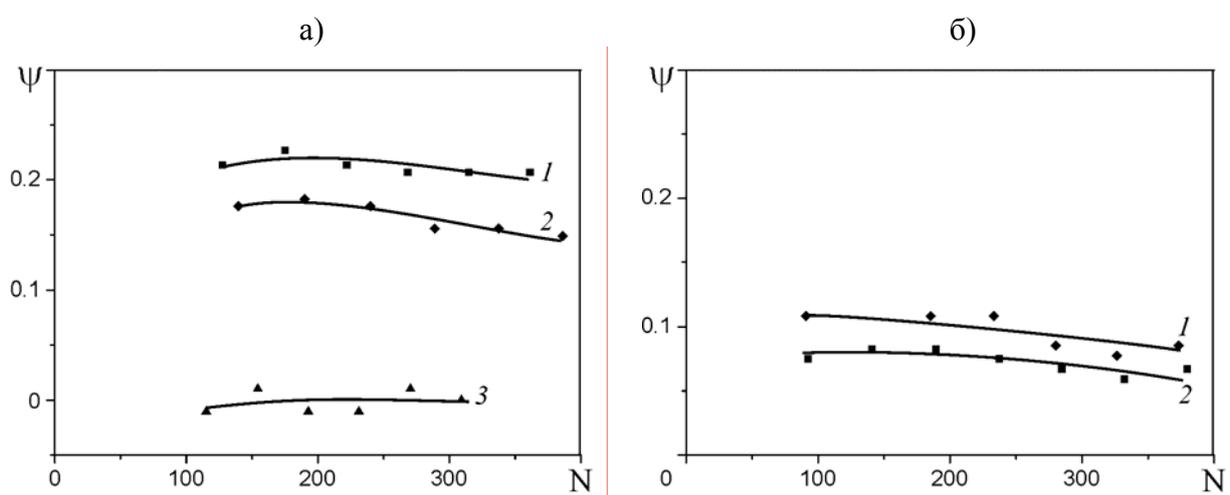


Рис. 5 – Зависимость доли сэкономленной электроэнергии ψ от кратности циркуляции дистиллированной воды (а) и прямой эмульсии нефти (б) в трубопроводе в присутствии присадки DP9-8177 и анионного (1), неионогенного (2) и катионного (3) ПАВ.

Введение же в турбулентный водный поток композиций из анионного сополимера и катионного ПАВ приводит к падению доли сэкономленной электроэнергии практически до

нуля, что по существу означает нейтрализацию положительного эффекта снижения энергозатрат, создаваемого индивидуальной полимерной присадкой. В качестве уточнения отметим, что введение катионного ПАВ в прямые эмульсии нефти приводило даже к быстрому расслоению эмульсий.

Из сопоставительного анализа данных рис. 4 и рис. 5 можно высказать предположение, что критериальные параметры вида $Z = \frac{\Psi}{T}$ могут служить своеобразными «индикаторами» влияния полимерных присадок на соотношение реологических и энергетических характеристик турбулентных потоков жидкостей, что особенно важно для сложных, многокомпонентных водонефтяных систем.

Уже по результатам проведённых экспериментов стала очевидной необходимость расширения фронта исследовательских работ по энергетическим аспектам процессов скоростной трубопроводной транспортировки жидкостей в присутствии различных по химической природе и молекулярным параметрам полимерных присадок и их композиций с ПАВ. В конечном итоге только научнообоснованный подход к этой проблеме будет способствовать разработке и успешному внедрению в промышленном масштабе прогрессивных энергосберегающих технологий при скоростной транспортировке жидкостей (в частности, прямых эмульсий нефти) по трубопроводам.

Литература

- [1] Мягченков В. А., Чичканов С. В. Эффект Томса в модельных и реальных системах (обзор). Ж. прикл. хим. 2005. Т. 78, Вып. 4. С. 529-544.
- [2] Иваненков В. В., Пименов О. В. Опыт использования противотурбулентных присадок на магистральных нефтепродуктопроводах. Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2006. № 2. С. 3-7.
- [3] Генфорд Ч. (1965) Физическая химия полимеров, Химия, Москва.
- [4] Мягченков В. А., Френкель С. Я. (1988) Композиционная неоднородность сополимеров, Химия, Ленинград.

[5] Мягченков В. А., Чичканов С. В. Влияние молекулярных параметров полиакриламида на процесс капиллярного массопереноса турбулентных водных потоков. Инж.-физ. журнал. 2005. Т. 78. № 3. С. 96-103.

[6] Мягченков В. А., Крикуненко О. В., Чуриков Ф. И. (1998) Ультразвуковая деструкция водорастворимых (со)полимеров. КХТИ, Казань.

[7] Чичканов С. В., Шамсуллин А. И., Мягченков В. А. Влияние молекулярных параметров анионных сополимеров акриламида на величину эффекта Томса в прямых эмульсиях нефти. Инж.-физ. журнал. 2007. Т. 80. №3. С. 155-163.

[8] Мягченков В. А., Чичканов С. В. Влияние концентрации и молекулярных параметров сополимеров акриламида с акрилатом натрия на величину эффекта Томса в прямых эмульсиях нефти. Журнал прикладной химии. 2003. Т. 76. Вып. 11. С. 1901-1905.

[9] Chichkanov S., Shamsullin A., Myagchenkov V. Reduction of energy losses in turbulent transportation of water-oil systems in presence of water soluble polymer additives. Proceedings of Baltic Polymer Symposium. Druskininkai, Lithuania, September 19-21, 2007. pp. 102-106.

[10] Шур А.М. (1981) Высокомолекулярные соединения. Высшая школа, Москва.

[11] Мягченков В. А., Чичканов С. В., Проскурина В. Е., Крупин С. В. Синергизм и антагонизм действия сополимеров акриламида и ПАВ в снижении гидравлического сопротивления турбулентных водных потоков. Георесурсы. 2003. № 1. С. 7-12.