

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ СДВИГА И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ ВЯЗКОСТЬ РАСТВОРА ПОЛИМЕРОВ

Нахай Д.М., Миканович Д.С., Бусел М.О.

Цель. Изучение особенностей изменения динамической вязкости неньютоновских жидкостей от изменения градиента скорости (скорости сдвига) и температуры.

Методы. Измерение вязкости растворов проводилось на ротационном вискозиметре ИКА ROTAVISC LO-VI. Для измерения температуры исследуемых растворов использовали криотермостат жидкостный FT-316-40. Добавление необходимого количества исследуемой жидкости осуществлялось с помощью пипеточного дозатора компании Thermo Fischer Scientific.

Результаты. По результатам проведенного детального анализа зависимости свойств полимерных (неньютоновских) жидкостей от процентного содержания поверхностно-активных веществ в растворе (от 0,1 до 3 %), степени нагрева исследуемых жидкостей (от 5 до 35 °С) и градиента скорости (скорости сдвига 1,28–259,13 с⁻¹) установлены особенности изменения динамической вязкости, указывающие на присутствие пристенного эффекта.

Область применения исследований. Полученные результаты важны для дальнейшего исследования поведения полимерных (неньютоновских) жидкостей, применяемых на промышленных объектах.

Ключевые слова: эффект пристенного скольжения, кривая вязкости, тиксотропные свойства, полимерная жидкость.

(Поступила в редакцию 13 января 2023 г.)

Введение

Поведение неньютоновских жидкостей при использовании в различных производственных процессах демонстрирует определенные аномалии их ламинарного течения. Анализ технологического процесса при производстве калийных удобрений на ОАО «Беларуськалий» показал, что при добавлении полимерных компонентов в воду повышается выход полезных веществ [1], однако данные полимерные добавки способствуют суффозии грунта, что, в свою очередь, снижает его прочностные характеристики при оборудовании земляных дамб и способствует возникновению чрезвычайных ситуаций. Исходя из анализа литературных источников [1–3], сделан вывод, что особенностью ламинарного течения является возникновение тонкого слоя [2], в результате разделения жидкой фазы на границе твердое – жидкое тело, что способствует уменьшению сопротивления и, как следствие, увеличению скорости движения исследуемой жидкости на границе взаимодействующих поверхностей.

В представленной статье рассмотрены процессы поведения полимерных жидкостей с учетом данных об их вязкости, измеренной на ротационном вискозиметре. Данный прибор позволяет с высокой точностью (до 1 %) наблюдать и фиксировать процессы изменения вязкости при различных физико-химических факторах воздействия.

Основная часть

Методика эксперимента. При проведении исследования нами использовались растворы полиакриламида (синтетический полимер (C₃H₅NO)_n) с процентным содержанием полимерных добавок в диапазоне от 0,1 до 3 %, раствор Техарон (лаурилсульфат натрия) с процентным содержанием вещества от 1 до 2 %, а также шлам калийного производства [5] (содержание полиакриламида и солей KCl, NaCl) с процентным содержанием полиакриламида до 1 %.

Измерение вязкости растворов проводилось на ротационном вискозиметре ROTA-VISC lo-vi Complete¹ (рис. 1) при скорости вращения коаксиального шпинделя (DIN-SP-6) от 1 до 200 оборотов в минуту, скорости сдвига жидкости $\dot{\gamma}$ от 1,28 до 259,13 с⁻¹, а также от напряжения сдвига τ от 0,03 до 0,55 Па соответственно. Данный вискозиметр определяет вязкость с точностью до 1 %. Для измерения температуры исследуемых растворов использовали криотермостат жидкостный FT-316-40 с точностью поддержания температуры $\pm 0,1$ °С (рис. 2). Коэффициент динамической вязкости η всех растворов фиксировали в диапазоне температур от 5 до 35 °С. Добавление необходимого количества исследуемой жидкости осуществлялось с помощью пипеточного дозатора компании Thermo Fischer Scientific в объеме 6,5 мкл на каждое измерение в зависимости от характеристик шпинделя.



Рисунок 1. – Вискозиметр ROTA-VISC lo-vi Complete



Рисунок 2. – Криотермостат FT-316-40

С целью увеличения точности проведенных исследований каждое измерение проводилось не менее пяти раз и определялось среднее значение при частоте вращения шпинделя: 1; 3,1; 7,8; 31,2; 83,5; 100,6 и 200 оборотов в минуту. В таблицах 1–2 приведены результаты измерений вязкости в температурном диапазоне от 5 до 15 °С для полиакриламида. Для Техароп и шлама при данных условиях изменения не происходят.

Таблица 1. – Вязкость полимерных жидкостей при температуре 5 °С

Полиакриламид – 0,1 %			Полиакриламид – 0,5 %			Полиакриламид – 2 %		
τ (Па)	$\dot{\gamma}$ (1/с)	η (мПас)	τ (Па)	$\dot{\gamma}$ (1/с)	η (мПас)	τ (Па)	$\dot{\gamma}$ (1/с)	η (мПас)
0,03	1,28	23,44	0,03	1,28	23,44	0,12	1,28	93,75
0,04	4,01	9,98	0,06	4,01	14,96	0,16	4,01	39,90
0,07	10,10	6,93	0,13	10,10	12,87	0,23	10,10	22,77
0,17	40,41	4,21	0,19	40,41	4,70	0,88	40,41	21,78
0,26	108,18	2,40	0,28	108,18	2,59	1,26	108,18	11,65
0,27	130,33	2,07	0,32	130,33	2,46	1,34	130,33	10,28
0,55	259,13	2,12	0,55	259,13	2,12	2,43	259,13	9,38

Таблица 2. – Вязкость полимерных жидкостей при температуре 10 °С

Полиакриламид – 0,1 %			Полиакриламид – 0,5 %			Полиакриламид – 2 %		
τ (Па)	$\dot{\gamma}$ (1/с)	η (мПас)	τ (Па)	$\dot{\gamma}$ (1/с)	η (мПас)	τ (Па)	$\dot{\gamma}$ (1/с)	η (мПас)
0,04	1,28	31,25	0,02	1,28	22,66	0,09	1,28	70,31
0,03	4,01	7,48	0,07	4,01	17,46	0,16	4,01	39,90
0,05	10,10	4,95	0,09	10,10	8,91	0,22	10,10	21,78
0,15	40,41	3,71	0,15	40,41	3,71	0,56	40,41	13,86
0,25	108,18	2,31	0,27	108,18	2,50	1,40	108,18	12,94
0,27	130,33	2,07	0,30	130,33	2,30	1,32	130,33	10,13
0,46	259,13	1,78	0,49	259,13	1,89	2,24	259,13	8,64

В результате проведенных исследований установлено, что коэффициент динамической вязкости растворов снижается с увеличением градиента скорости (скорости сдвига).

¹ Ротационный вискозиметр ROTA-VISC lo-vi Complete. Технические характеристики [Электронный ресурс] // ИКА Лабораторное оборудование. – Режим доступа: <https://www.ika.com/ru/Products-Lab-Eq/Viscometers-csp-279/ROTA-VISC-lo-vi-Complete-cpdt-25000310>. – Дата доступа: 05.01.2023.

Данное снижение показывает, что исследуемые растворы имеют тиксотропные свойства [4], что, в свою очередь, показывает их текучесть при механическом воздействии. На рисунках 3–4 представлены результаты измерений вязкости растворов полиакриламида с процентным содержанием 0,1–2 % при температуре 5 и 10 °С соответственно.

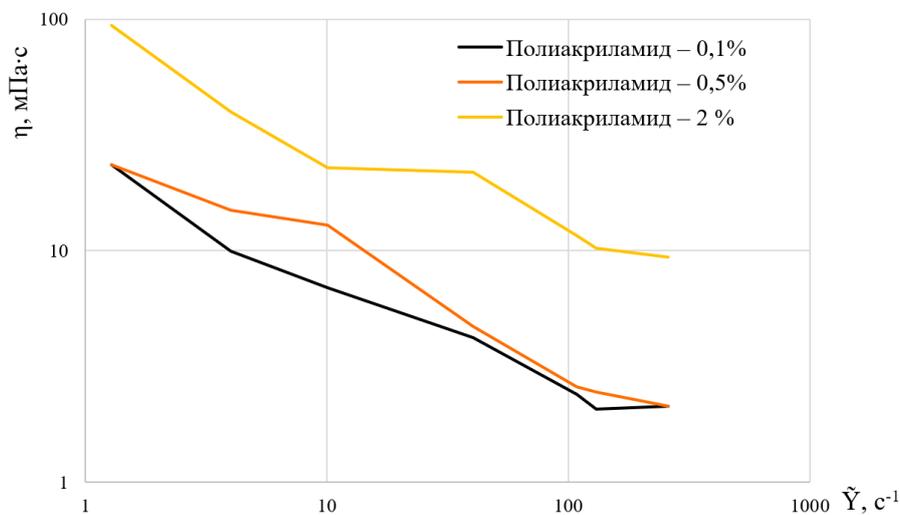


Рисунок 3. – Зависимость динамической вязкости полиакриламидов от градиента скорости при температуре 5 °С (логарифмическая шкала)

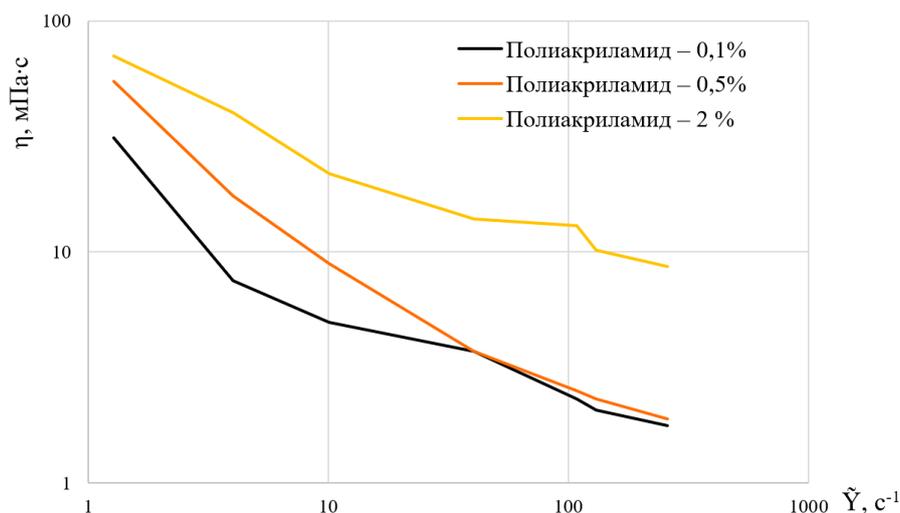


Рисунок 4. – Зависимость динамической вязкости полиакриламидов от градиента скорости при температуре 10 °С (логарифмическая шкала)

Исходя из анализа экспериментальных данных установлено, что растворы полиакриламида с концентрацией 0,1; 0,5 и 2 % ведут себя как тиксотропные жидкости, т.е. вязкость снижается с увеличением скорости сдвига, но при низких скоростях сдвига от 1,28 до 40,1 c^{-1} наблюдается более выраженное снижение вязкости.

В рамках реологической модели, когда вязкость снижается с увеличением скорости сдвига, упругое свойство полимерных жидкостей теряется путем разрушения ассоциатов макромолекул [2].

При проведении дальнейших экспериментов с повышением температуры исследуемых жидкостей наблюдались амплитудные скачки на минимальных скоростях сдвига. Данные амплитудные скачки начинали проявляться при температуре 15 °С и выше. В целях оценки поведения полимерных жидкостей при данной температуре помимо растворов полиакриламида был проведен эксперимент с раствором ПАВ Техароп различной концентрации, а также со шламом калийного производства. Результаты измерений вязкости раствора ПАВ Техароп с процентным содержанием 1–2 % и растворов полиакриламида с процент-

ным содержанием 0,1–2 % при температуре 15 и 20 °С представлены на рисунках 5 и 6 соответственно.

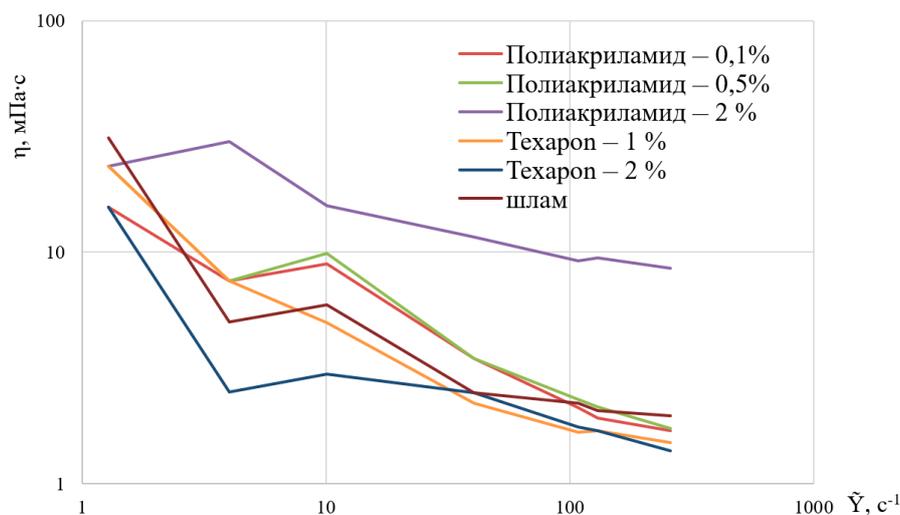


Рисунок 5. – Зависимость динамической вязкости растворов полиакриламида и Техарон от градиента скорости при температуре 15 °С (логарифмическая шкала)

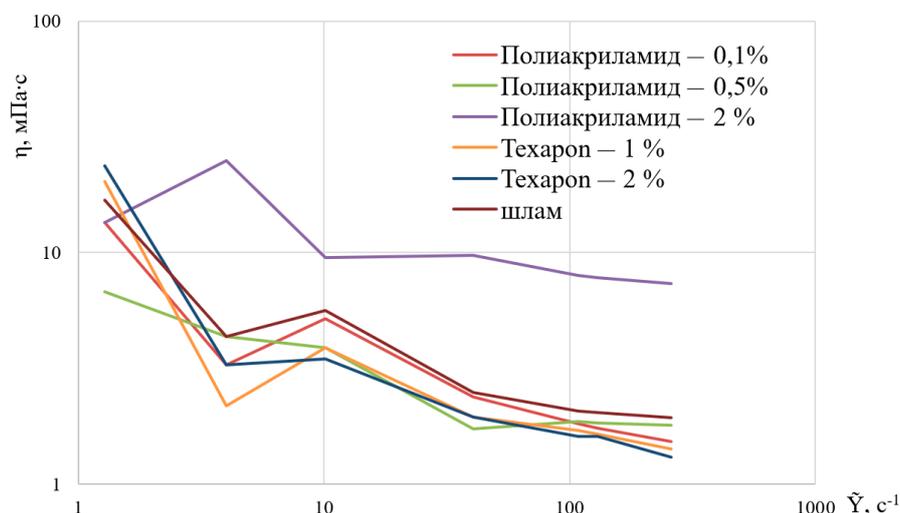


Рисунок 6. – Зависимость динамической вязкости растворов Техарон и полиакриламида, шлама калийного производства от градиента скорости при температуре 20 °С

В результате анализа экспериментальных данных установлено, что с увеличением температуры полимерных жидкостей проявляются амплитудные скачки линии вязкости, которые сопровождаются резким снижением и мгновенным ее увеличением при низких скоростях сдвига 1,28 до 40,41 с⁻¹. Стоит отметить, что данные амплитудные скачки мгновенного изменения вязкости характерны для полимерных жидкостей с процентным содержанием ПАВ от 0,1 до 2 %. При содержании 2 % и выше тиксотропные свойства полимеров не теряются [3–4].

Следует отметить, что при дальнейшем повышении температуры (свыше 20, до 35 °С) амплитудные скачки в диапазоне скорости сдвига жидкости от 1,28 до 10,1 с⁻¹ продолжают проявляться во всех исследуемых растворах (полиакриламид, Техарон, шлам). При этом поведение полимерных жидкостей с увеличением процентного содержания полимерных компонентов существенно менялось. При температурах 25 °С и выше в жидкостях с содержанием 2–3 % ПАВ эффект амплитудных скачков кривой вязкости снижается или вовсе исчезает.

При замере раствора полиакриламида с концентрацией 3 % состав получился очень вязкий, в связи с чем мощность ротационного вискозиметра ROTAVISC позволила изме-

речь динамическую вязкость только при скоростях сдвига от 1,28 и 40,41 с⁻¹. Амплитудных скачков в данном эксперименте не наблюдалось.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что динамическая вязкость полимерных (неньютоновских) жидкостей с увеличением градиента скорости снижается. В диапазоне скорости сдвига от 1,28 до 40,41 с⁻¹ при различных температурах нагревания и процентном содержании активных веществ происходит более выраженное снижение (амплитудный скачок) динамической вязкости, что может являться эффектом пристенного скольжения за счет образования тонкого слоя в результате разделения жидкой фазы. Положительным эффектом данного явления является повышение выхода полезных веществ в производстве калийных удобрений за счет добавления полимерных компонентов. Но, в свою очередь, оно также имеет и негативное воздействие при возведении земляных сооружений за счет суффозии грунта. Для более точного объяснения данного эффекта будут проведены дополнительные исследования по изучению влияния полимерных добавок на фильтрацию (насыщение) различных наполнителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миканович, Д.С. Прогнозирование возникновения чрезвычайных ситуаций на грунтовых подпорных сооружениях шламохранилищ Республики Беларусь: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.02 / Д.С. Миканович. – Минск, 2020. – 212 л.
2. Astarita, G. Non-newtonian gravity flow along inclined plane surfaces / G. Astarita, G. Marrucci, G. Palumbo // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. – 1964. – Vol. 3, No. 4. – P. 333–339. – DOI: 10.1021/i160012a010.
3. Morrison, S.R. Wall effect in coquette flow of non-newtonian suspensions / S.R. Morrison, J.C. Harper // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. – 1965. – Vol. 4, No. 2. – P. 176–181. – DOI: 10.1021/i160014a014.
4. Carreau, P.J. Wall effects in polymer flow on inclined plane / P.J. Carreau, Q.H. Bui, P. Leroux // *Rheology Acta*. – 1979. – Vol. 18, No. 5. – P. 600–608. – DOI: 10.1007/bf01520356.
5. Миканович, Д.С. Исследование фильтрационных свойств грунтов ограждающих сооружений шламохранилищ с учетом влияния эффекта пристенного скольжения / Д.С. Миканович, Г.Ф. Ласута // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2019. – Т. 3, № 2. – С. 166–177. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-2.166. – EDN: WKMNAK.

**Влияние скорости сдвига и температуры на динамическую вязкость
раствора полимеров**

**Influence of shear rate and temperature on the dynamic viscosity
of a polymer solution**

Нахай Дмитрий Михайлович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра химической,
биологической, радиационной и ядерной
защиты, преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: eurotitaner@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5989-5465

Dmitriy M. Nakhay

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Chemical, Biological, Radiation
and Nuclear Protection, Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: eurotitaner@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5989-5465

Миканович Дмитрий Станиславович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет
предупреждения и ликвидации чрезвычайных
ситуаций, начальник факультета

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: dmikanovich@list.ru

ORCID: 0000-0002-3560-1741

Dmitriy S. Mikanovich

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Emergency Prevention and Elimination,
Head of Faculty

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: dmikanovich@list.ru

ORCID: 0000-0002-3560-1741

Бусел Михаил Олегович

кандидат технических наук
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра химической,
биологической, радиационной и ядерной
защиты, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: Mischabox@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9467-218X

Mikhail O. Busel

PhD in Technical Sciences
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Chemical, Biological, Radiation
and Nuclear Protection, Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: Mischabox@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9467-218X

INFLUENCE OF SHEAR RATE AND TEMPERATURE ON THE DYNAMIC VISCOSITY OF A POLYMER SOLUTION

Nakhay D.M., Mikanovich D.S., Busel M.O.

Purpose. Study of the features of changes in the dynamic viscosity of non-Newtonian fluids due to changes in the velocity gradient (shear rate) gradient and temperature.

Methods. The viscosity of the solutions was measured on an IKA ROTAVISC LO-VI rotational viscometer. An FT-316-40 liquid cryothermostat was used to measure the temperature of the studied solutions. The addition of the required amount of the test liquid was carried out using a Thermo Fischer Scientific pipette dispenser.

Findings. According to the results of a detailed analysis of the dependence of the properties of polymeric (non-Newtonian) liquids on the percentage of surface active substances in the solution (from 0.1 to 3 %), the degree of heating of the studied liquids (from 5 to 35 °C) and the velocity gradient (shear rate 1.28–259.13 s⁻¹), the features of the change in dynamic viscosity were established, indicating the presence of a near-wall effect.

Application field of research. The results obtained are important for further investigation of the behavior of polymeric (non-Newtonian) fluids used in industrial facilities.

Keywords: wall slip effect, viscosity curve, thixotropic properties, polymer liquid.

(The date of submitting: January 13, 2023)

REFERENCES

1. Mikanovich, D.S. Prognozirovanie vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy na gruntovykh podpornykh sooruzheniyakh shlamokhranilishch Respubliki Belarus' [Forecasting the occurrence of emergencies at earth retaining structures of sludge storage facilities of the Republic of Belarus]. PhD tech. sci. diss.: 05.26.02. Minsk, 2020. 212 p. (rus)
2. Astarita G., Marrucci G., Palumbo G. Non-newtonian gravity flow along inclined plane surfaces. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1964. Vol. 3, No. 4. Pp. 333–339. – DOI: 10.1021/i160012a010.
3. Morrison S.R., Harper J.C. Wall effect in coquette flow of non-newtonian suspensions. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1965. Vol. 4, No. 2. Pp. 176–181. DOI: 10.1021/i160014a014.
4. Carreau P.J., Bui Q.H., Leroux P. Wall effects in polymer flow on inclined plane. *Rheology Acta*, 1979. Vol. 18, No. 5. Pp. 600–608. DOI: 10.1007/bf01520356.
5. Mikanovich D.S., Lasuta G.F. Issledovanie fil'tratsionnykh svoystv gruntov ograzhdayushchikh sooruzheniy shlamokhranilishch s uchetom vliyaniya effekta pristennogo skol'zheniya [Investigation of the filtration properties of the soils of the enclosing structures of sludge storages, taking into account the influence of the near-wall sliding effect]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 2. Pp. 166–177. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-2.166. EDN: WKMNAK.