

ОСОБЕННОСТИ ПОДЪЕМА НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ПОРИСТОМ МАТЕРИАЛЕ

Нахай Д.М., Байков В.И., Миканович Д.С.

Цель. Изучение особенностей подъема полимерных растворов разной концентрации в пористом материале.

Методы. Экспериментальный метод исследования с использованием математических методов обработки результатов измерений.

Результаты. Выявлено, что интенсивность насыщения пористого материала растворами полиакриламида значительно снижалась после первых 30 с эксперимента. Кроме того, скорость насыщения пористого материала уменьшалась с увеличением концентрации полиакриламида в растворе. В отличие от дистиллированной воды растворы полиакриламида продолжали подниматься до полного насыщения пористого материала, что указывает на возможное присутствие пристенного эффекта скольжения.

Область применения исследований. Полученные результаты важны для дальнейшего исследования поведения полимерных растворов, применяемых на промышленных объектах.

Ключевые слова: капиллярный эффект, эффект пристенного скольжения.

(Поступила в редакцию 29 ноября 2023 г.)

Введение

Во многих странах мира, в том числе в Республике Беларусь, имеются хранилища жидких отходов (шламохранилища или хвостохранилища). Хвостовые хозяйства калийных производств связаны с устройством солеотвалов, строительством и эксплуатацией шламохранилищ для складирования жидких шламов. Солевые шламы содержат ряд различных примесей, которые по своим реологическим свойствам можно отнести к неньютоновским жидкостям.

Актуальность темы исследования обусловлена естественным старением существующих и строительством новых шламохранилищ. В Республике Беларусь имеется более 30 шламохранилищ для хранения шламов калийного производства. Этапом развития научных исследований в данной области на территории Республики Беларусь является работа С.Ф. Шемета и Н.Н. Прохорова «Методы оценки технического состояния ограждающих дамб шламохранилищ калийного производства». Авторами была представлена и проанализирована схема районирования территории ОАО «Беларуськалий», позволяющая сократить рост площадей, используемых для размещения отходов. Однако до настоящего времени отсутствует оценка состояния и устойчивости данных сооружений с точки зрения воздействия негативных факторов, способствующих возникновению возможных чрезвычайных ситуаций на них. Одним из таких факторов является повышенная фильтрация в теле дамб. Сказанное является дополнительным аргументом для детального исследования реологических свойств солевых шламов.

Поведение неньютоновских жидкостей при использовании в различных производственных процессах демонстрирует определенные аномалии их ламинарного течения. Исходя из проведенного обширного литературного обзора экспериментальных исследований по неньютоновскому гравитационному течению жидкостей с 1960 по 2024 г. таких авторов, как G. Astarita, P.J. Carreau, S.R. Morrison, N.J. Balmforth, В.И. Байков, А.Д. Чорный и др. [1–5], установлено, что все проводимые ими опыты были направлены на изучение движения полимерных жидкостей по различным наклонным плоскостям.

В результате анализа литературных источников [6–8] по поверхностному натяжению и связанных с ним явлений, в частности движения жидкостей без полимерных примесей (ньютоновская жидкость) при капиллярном эффекте, установлено, что одним из основных

параметров, определяющих это движение, являются силы поверхностного натяжения на границе раздела несмешивающихся сред [9].

Например, при отсутствии силы тяжести свободная жидкость будет пытаться занять некоторый объем в форме шара, что показывает способность молекул жидкости, находящихся в поверхностном слое, взаимодействовать друг с другом, образуя тонкую пленку. В случае жидкости, находящейся на горизонтальной твердой поверхности, ее форма будет определяться тремя силами поверхностного натяжения: жидкость – газ, жидкость – твердое тело, твердое тело – газ.

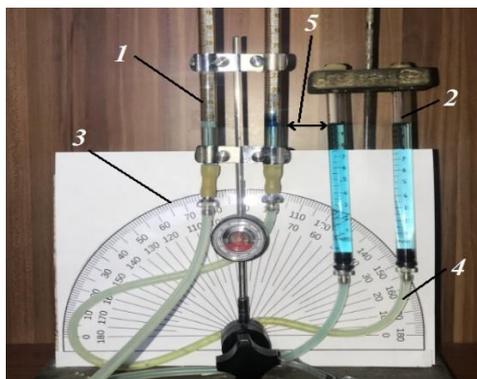
У полимерных растворов силы поверхностного натяжения на границе жидкость – твердое тело ниже, чем у ньютоновской жидкости, что способствует лучшему смачиванию поверхности. Данный факт объясняется возникновением в очень тонком слое порядка 10–100 мкм эффекта пристенного скольжения: мономолекулярный слой полимера «прилипает» к поверхности твердого тела, а жидкость скользит по нему (кажущееся скольжение) [10].

В данной работе проведен анализ движения неньютоновской жидкости через пористый материал. Суть экспериментальных исследований состояла в определении особенностей подъема жидкости в пористом материале.

Основная часть

Методика эксперимента. При проведении исследования в качестве полимерных растворов нами использовались растворы полиакриламида (синтетический полимер $(C_3H_5NO)_n$) с массовым содержанием полимерных добавок от 0,1 до 2,5 %. В качестве растворителя, а также ньютоновской жидкости использовалась дистиллированная вода.

Оценка массового соотношения полимера и воды проводилась с помощью электронных весов Scout Pro. В качестве пористого материала использовалась полоска фильтровальной бумаги «ФС-3» средней фильтрации, плотностью 75 г/м^2 , высотой 150 мм. На фильтровальную бумагу была нанесена миллиметровая шкала. С целью улучшения условий наблюдения на бумагу также наносился контраст Dolce Costo, при соприкосновении жидкости с которым бумага окрашивалась в синий цвет. Установка для проведения исследований показана на рисунке 1.



1 – бюретки вместимостью 25 мл; 2 – бюретки вместимостью 12,9 мл; 3 – водяной угломер;
4 – трубки подачи раствора; 5 – точка соприкосновения фильтровальной бумаги.

Рисунок 1. – Лабораторная установка для проведения исследований

Полоски фильтровальной бумаги помещались в две бюретки 1 вместимостью 12,9 мл, установленные вертикально, что контролировалось с помощью водяного угломера 3 с ценой деления 1° . Затем в специальные бюретки 2 вместимостью 25,0 мл¹ заливался исследуемый раствор. Растворы от бюреток 2 подавались в бюретки 1 через трубки 4 таким образом, чтобы в ходе эксперимента верхняя граница жидкости в бюретке 1 соприкасалась с началом шкалы на полоске фильтровальной бумаги.

¹ Приборы мерные лабораторные стеклянные. Бюретки, пипетки. Технические условия: ГОСТ 20292-74* (СТ СЭВ 1247, СТ СЭВ 4020-83). – Введ. 01.07.85. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 29 с.

Отсчет времени начинался в момент соприкосновения исследуемого раствора с началом шкалы на фильтровальной бумаге. В связи с быстрым первоначальным подъемом раствора измерения в интервале 0–10 с проводились через 0,5 с, в интервале 10–60 с через 5 с, и далее до 16 мин (960 с) через 30 с. Время измерялось секундомером Torres Professional Stopwatch SW-100 с точностью 0,01 с. Условия проведения исследований соответствовали условиям эксплуатации измерительного оборудования.

Для каждого раствора измерения проводились пять раз, и далее определялось среднее значение высоты подъема жидкости в пористом материале.

На рисунках 2–8 приведены графики зависимости высоты подъема жидкости в пористом материале от времени.

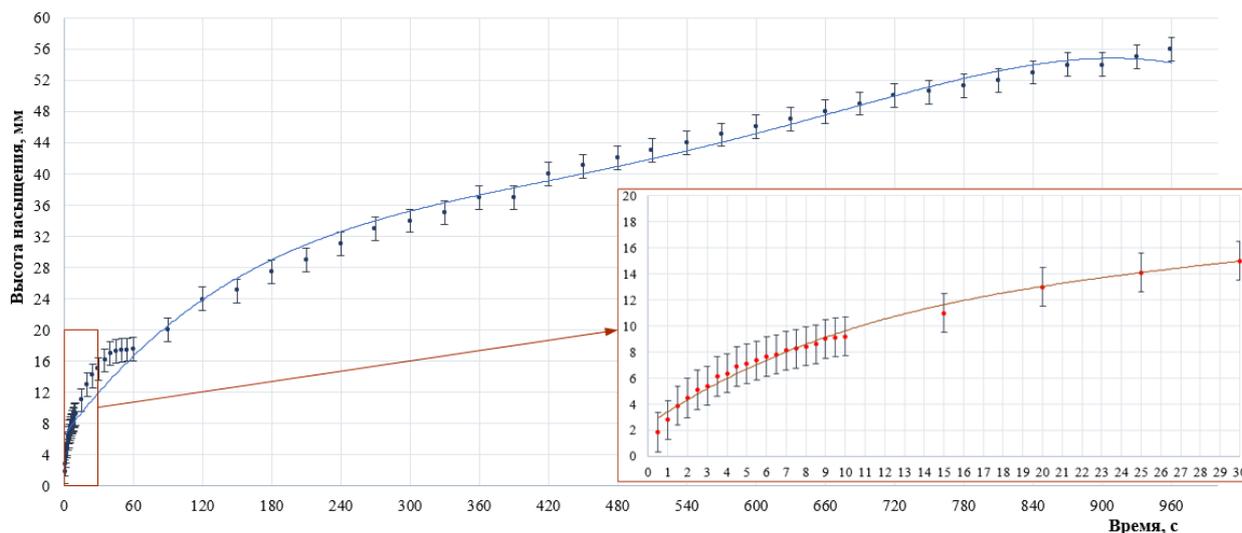


Рисунок 2. – График зависимости высоты насыщения пористого материала 0,1 %-м раствором полиакриламида за 960 с

Проведенные исследования показали, что линия насыщения пористого материала 0,1 %-м раствором полиакриламида имеет более интенсивный подъем за первые 30 с, затем линия выполаживается, свидетельствуя о замедлении скорости насыщения (рис. 2).

Аналогичное поведение наблюдалось у 0,5 %-го раствора полиакриламида: первые 30 с высота подъема раствора в пористом материале достигла 8,4 мм, затем линия насыщения начала выполаживаться (рис. 3). Однако на 30-й с точка насыщения у 0,5 %-го раствора полиакриламида расположена ниже, чем у 0,1 %-го.

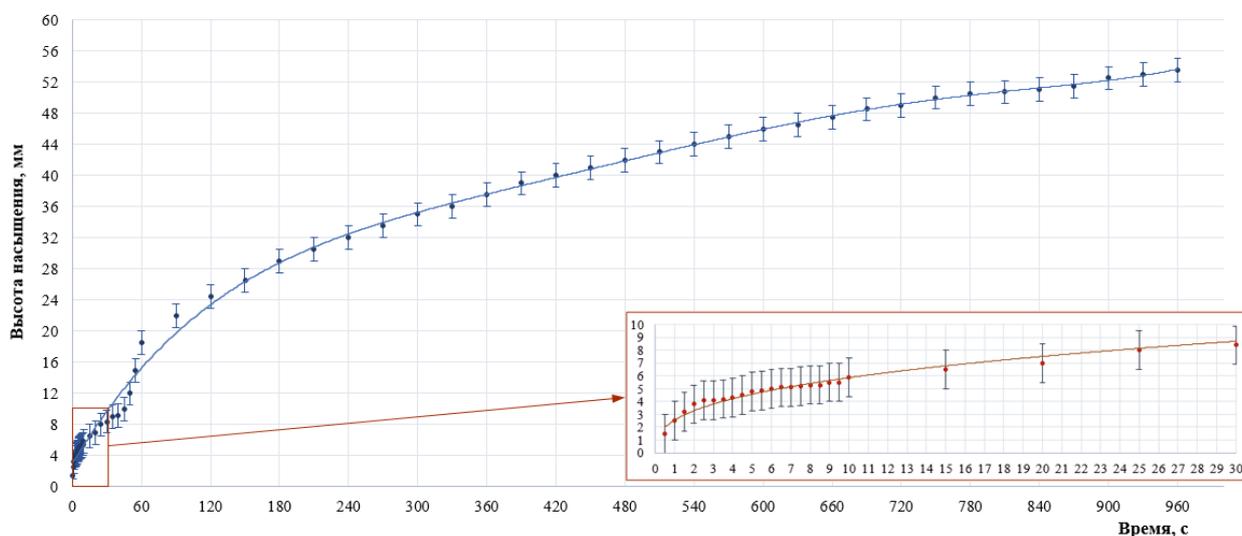


Рисунок 3. – График зависимости высоты насыщения пористого материала 0,5 %-м раствором полиакриламида за 960 с

Далее аналогичные замеры проводились для растворов с процентным содержанием 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5 % (рис. 4–7). В целях сравнительного анализа были проведены исследования по оценке скорости насыщения пористого материала ньютоновской жидкостью – дистиллированной водой (рис. 8).

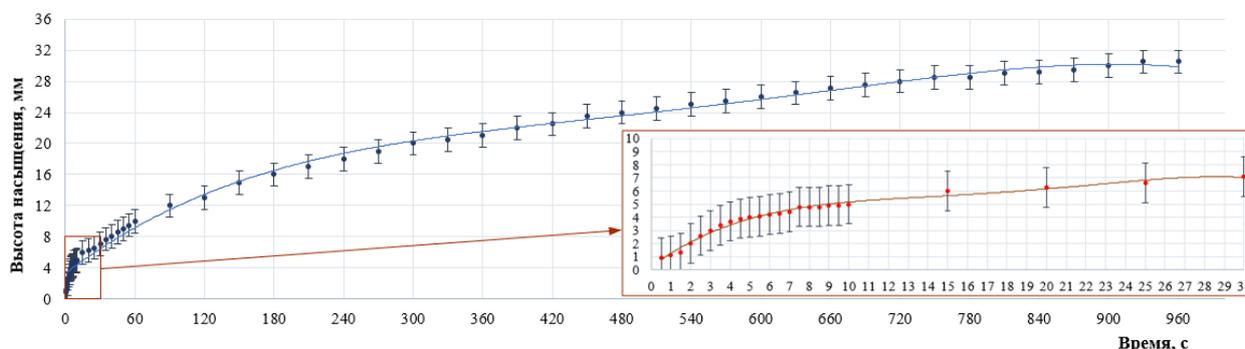


Рисунок 4. – График зависимости высоты насыщения пористого материала 1,0 %-м раствором полиакриламида за 960 с

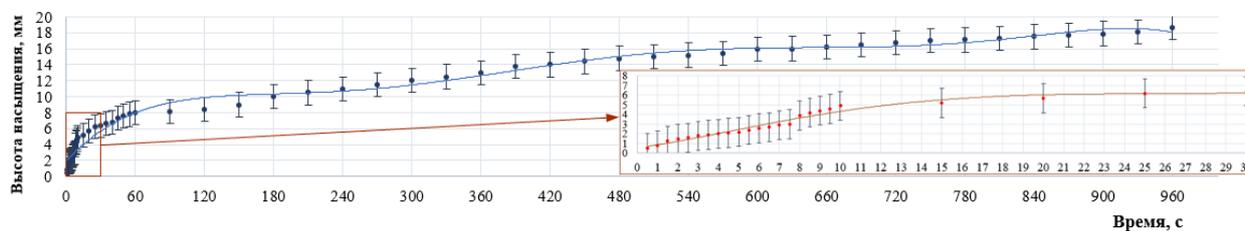


Рисунок 5. – График зависимости высоты насыщения пористого материала 1,5 %-м раствором полиакриламида за 960 с

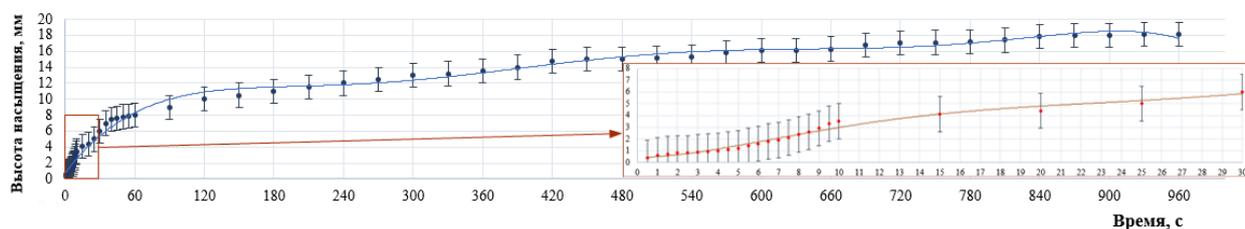


Рисунок 6. – График зависимости высоты насыщения пористого материала 2,0 %-м раствором полиакриламида за 960 с

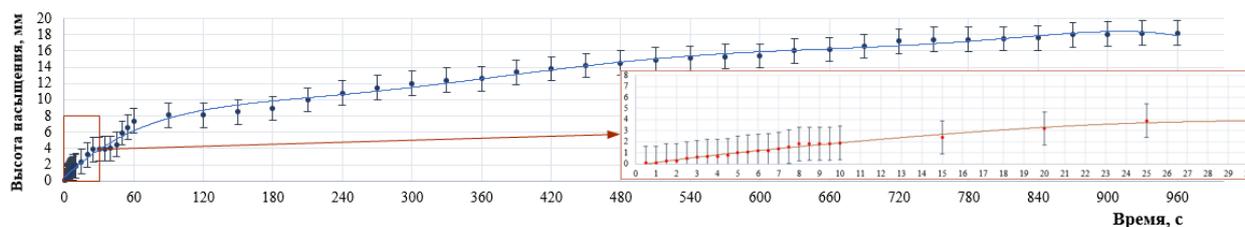


Рисунок 7. – График зависимости высоты пористого материала 2,5 %-м раствором полиакриламида за 960 с

Анализ результатов проведенных исследований показал, что спустя 30 с скорость насыщения пористого материала растворами полиакриламида различных концентраций начинает уменьшаться. При этом скорость насыщения пористого материала уменьшается с увеличением концентрации полиакриламида в растворе (табл. 1). Так, наиболее низкие показатели высоты насыщения пористого материала показали растворы полиакриламида с концентрацией 1,5–2,5 %.

Таблица 1. – Высоты насыщения пористого материала растворами полиакриламида

Раствор	Высота насыщения пористого материала раствором, мм	
	на 30-й секунде	на 960-й секунде
Дистиллированная вода	22,0	99,0
0,1 %-й раствор полиакриламида	15,0	56,0
0,5 %-й раствор полиакриламида	8,4	53,5
1,0 %-й раствор полиакриламида	7,1	30,5
1,5 %-й раствор полиакриламида	6,4	18,7
2,0 %-й раствор полиакриламида	6,0	18,1
2,5 %-й раствор полиакриламида	3,9	18,2

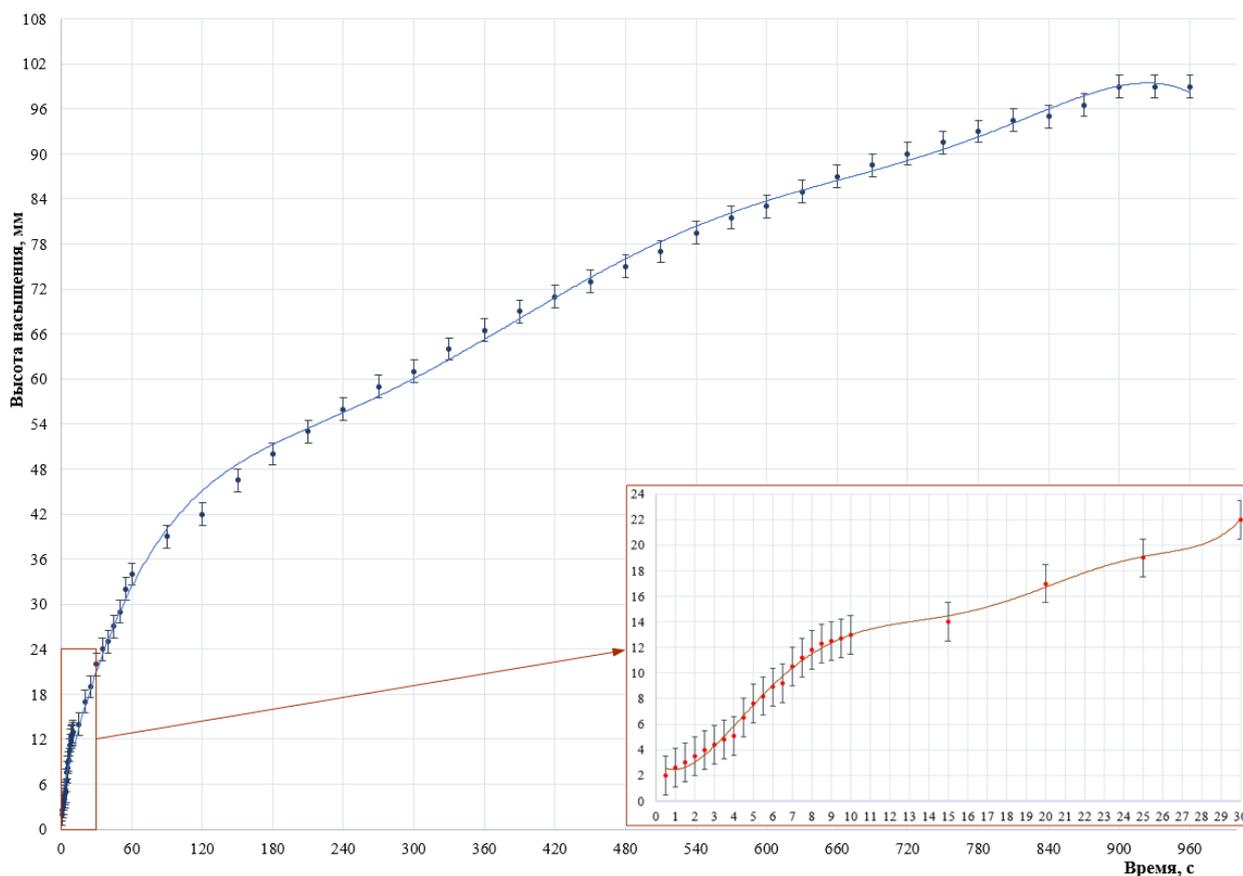


Рисунок 8. – График зависимости высоты насыщения пористого материала дистиллированной водой за 960 с

Следует отметить, что высота подъема дистиллированной воды за 20 с составляет 17 мм, что существенно превышает показатели полимерных растворов. Однако дистиллированная вода поднимается до отметки 99 мм, после чего останавливается. Данное поведение объясняется действием уравновешивающих сил. Если условно представить пористый материал в виде капилляра, закрепленного строго в вертикальном положении, то подъем ньютоновской жидкости в нем будет продолжаться до тех пор, пока сила тяжести, действующая на столб жидкости, не станет равной по модулю вертикальной составляющей результирующей сил поверхностного натяжения, действующих вдоль границы соприкосновения жидкости с поверхностью капилляра [9].

В отличие от дистиллированной воды испытуемые растворы полиакриламида продолжали подниматься до полного насыщения пористого материала. Такая особенность жидкости при насыщении возможна не только за счет капиллярного эффекта, как в случае с ньютоновской жидкостью, но и за счет пристенного эффекта. В непосредственной близости к стенке капилляра движущаяся неньютоновская среда расслаивается, образуя весьма тонкий слой с пониженной концентрацией полимера. Образующийся пристенный слой раствора

может являться скользящим звеном, благодаря которому подъем раствора не останавливается до полного насыщения пористого материала.

Заключение

В результате анализа проведенных лабораторных исследований по оценке зависимости высоты насыщения пористого материала раствором полиакриламида (концентрации 0,1–2,5 %) от времени, выявлено различие скоростей насыщения пористого материала: чем выше в растворе содержание полиакриламида, тем медленнее происходит насыщение.

Проведенные исследования ньютоновской и неньютоновской жидкости показали, что ньютоновская жидкость до определенного момента времени имеет высокую скорость подъема в пористом материале, но затем процесс подъема останавливается. Что касается неньютоновской жидкости – растворов с наличием полиакриламида – подъем продолжался до полного насыщения пористого материала. Такой эффект требует дальнейшего изучения с точки зрения установления механизма возникновения пристенного эффекта при движении неньютоновских жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
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. Balmforth, N.J. Yielding to Stress: Recent Developments in Viscoplastic Fluid Mechanics / N.J. Balmforth, I.A. Frigaard, G. Ovarlez // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2014. – Vol. 46, No. 1. – P. 121–146. – DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141424.
5. Байков, В.И. Увлечение неньютоновской жидкости движущейся наклонной пластиной / В.И. Байков, А.Д. Чорный // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. – 2019. – Т. 63, № 6. – С. 761–768. – DOI: 10.29235/1561-8323-2019-63-6-761-768. – EDN: OAKWYX.
6. Haeri, S. Experimental study of gravity-driven film flow of non-Newtonian fluids / S. Haeri, S.H. Hashemabadi // *Chemical Engineering Communications*. – 2009. – Vol. 196, No. 5. – P. 519–529. – DOI: 10.1080/00986440802484481.
7. Siddiqui, A.M. Withdrawal and drainage of thin film flow on a vertical cylinder / A.M. Siddiqui [et al.] // *Scientific Research and Essays*. – 2012. – Vol. 7, No. 41. – P. 3554–3565. – DOI: 10.5897/sre12.233.
8. São, Y.T. Obtaining flow curve for viscoplastic fluids through inclined open-channel apparatus / Y.T. São [et al.] // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2021. – Vol. 43, No. 5. – Article 278. – DOI: 10.1007/s40430-021-02999-2.
9. Крылов, А.Б. Поверхностное натяжение и связанные с ним явления: учебно-методическое пособие / А.Б. Крылов. – Минск: БГМУ, 2008. – 30 с.
10. 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.

Особенности подъема неньютоновских жидкостей в пористом материале
Peculiarities of lifting of non-Newtonian fluids in porous material

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

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

Байков Валентин Иванович

доктор технических наук, доцент

Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси», лаборатория турбулентности, главный научный сотрудник

Адрес: ул. П. Бровки, 15,
220072, г. Минск, Беларусь

Email: baikov@hmti.ac.by

Valentin I. Baykov

Grand PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Scientific Institution «A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus», Turbulence Laboratory, Chief Researcher

Address: P. Brovki str., 15,
220072, Minsk, Belarus

Email: baikov@hmti.ac.by

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

SPIN-код: 1516-9648

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

PECULIARITIES OF LIFTING OF NON-NEWTONIAN FLUIDS IN POROUS MATERIAL

Nakhay D.M., Baykov V.I., Mikanovich D.S.

Purpose. To study the peculiarities of polymer solutions, rise of different concentrations in porous material.

Methods. Experimental method of research with the use of mathematical methods of processing of measurement results.

Findings. It was found that the intensity of saturation of porous material with polyacrylamide solutions significantly decreased after initial 30 s of the experiment. In addition, the rate of saturation of porous material decreased with increasing concentration of polyacrylamide in the solution. In contrast to distilled water, the polyacrylamide solutions continued to rise until the porous material was completely saturated, indicating the possibility of near-wall slip effect.

Application field of research. The obtained results are important for further investigation of the behavior of polymer solutions used at industrial facilities.

Keywords: capillary effect, wall slip effect.

(The date of submitting: November 29, 2023)

REFERENCES

1. 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.
2. 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.
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. Balmforth N.J., Frigaard I.A., Ovarlez G. Yielding to Stress: Recent Developments in Viscoplastic Fluid Mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014. Vol. 46, No. 1. Pp. 121–146. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141424.
5. Baykov V.I., Chornyy A.D. Uvlechenie nen'yutonovskoy zhidkosti dvizhushcheysya naklonnoy platinoy [Capturing a non-Newtonian fluid by a moving inclined plate]. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019. Vol. 63, No. 6. Pp. (rus). DOI: 10.29235/1561-8323-2019-63-6-761-768. EDN: OAKWYX.
6. Haeri S., Hashemabadi S.H. Experimental study of gravity-driven film flow of non-Newtonian fluids. *Chemical Engineering Communications*, 2009. Vol. 196, No. 5. Pp. 519–529. DOI: 10.1080/00986440802484481.
7. Siddiqui A.M., Akram M., Memon K.N., Islam S., Khan K. Withdrawal and drainage of thin film flow on a vertical cylinder. *Scientific Research and Essays*, 2012. Vol. 7, No. 41. Pp. 3554–3565. DOI: 10.5897/sre12.233.
8. São Y.T., Pereira J.B., Fiorot G.H., Maciel, G.F. Obtaining flow curve for viscoplastic fluids through inclined open-channel apparatus. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021. Vol. 43, No. 5. Article 278. DOI: 10.1007/s40430-021-02999-2.
9. Krylov A.B. *Poverkhnostnoe natyazhenie i svyazannye s nim yavleniya* [Surface tension and related phenomena]: tutorial. Minsk: Belarusian State Medical University, 2008. 30 p. (rus)
10. Mikanovich, D.S. *Prognozirovanie vznikoveniya 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)