

РАСТЕКАНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ И ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРА ПО ТВЕРДОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Байков В.И., Нахай Д.М.

Цель. Экспериментально исследовать и сравнить с теоретическими расчетами кинетику растекания капли водного раствора полимера и кипяченой водопроводной воды по горизонтальной твердой поверхности.

Методы. Экспериментальные исследования.

Результаты. Опытным путем найдены: коэффициент поверхностного натяжения жидкости капли на границе с воздухом; вязкость при малых скоростях сдвига жидкости и ее плотность; равновесный краевой угол. Установлено, что происходит ограниченное растекание капли до радиуса, который соответствует равновесному краевому углу. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных изменения радиуса растекания капли во времени, которое показало, что результаты качественно согласуются между собой.

Область применения исследований. Полученные результаты важны для исследования динамики процесса тушения пожара твердых материалов водными растворами поликарбамида разной концентрации.

Ключевые слова: краевой угол, равновесный краевой угол, коэффициент поверхностного натяжения, динамическая вязкость, кинематическая вязкость.

(Поступила в редакцию 25 апреля 2025 г.)

Введение

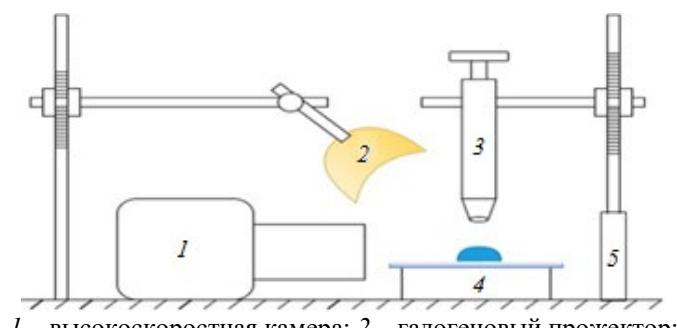
Вода является широко применяемым огнетушащим средством тушения пожаров веществ в различных агрегатных состояниях. Для повышения огнетушащих свойств воды в нее вводят поверхностно-активные вещества, применяют различного рода загустители, увеличивающие вязкость воды и одновременно повышающие адгезию, т.е. способность воды задерживаться на поверхности твердого горящего тела. Добавление в воду незначительного количества высокомолекулярных полимеров позволяет существенно сократить сопротивление транспортирующих такую воду трубопроводов.

Имеющиеся в литературе экспериментальные данные по кинетике растекания капли жидкости [1–3] получены для высоковязких сред, поэтому особый интерес представляет собой растекание капель маловязких жидкостей, одним из представителей которых является вода и ее растворы.

Основная часть

Экспериментальные исследования. В качестве рабочих образцов водных растворов полимера был выбран поликарбамид (синтетический полимер $(C_3H_5NO)_n$, далее – ПАМ) с массовым содержанием полимерных добавок 0,01; 0,05; 0,1 и 0,5 %, в качестве растворителя – кипяченая водопроводная вода (далее – вода).

Для исследования кинетики растекания капли воды и водного раствора полимера после ее падения на горизонтально расположенную стеклянную поверхность была создана установка, схема которой изображена на рисунке 1.



1 – высокоскоростная камера; 2 – галогеновый прожектор;
3 – пипеточный дозатор; 4 – подложка; 5 – кронштейн

Рисунок 1. – Схема рабочей установки

Установка включала высокоскоростную камеру с объективом для макросъемки Evercam 4000-32-C¹, позволяющую масштабировать процесс растекания капли и производить видеосъемку со скоростью 7047 к/с (кадров в секунду) и минимальным временем экспозиции 1 мкс с шагом 1 мкс. Для освещения процесса растекания капли, а также для качественной цветопередачи, четкого изображения и устранения мерцания видеокадров в проводимом эксперименте использовался галогеновый прожектор мощностью 1500 Вт, цветовой температурой R7s и световым потоком 3000 лм. Для выдавливания исследуемой капли на твердую горизонтальную поверхность применялся пипеточный дозатор Thermo Fischer Scientific ДПОП-1-0,5-5², жестко закрепленный в кронштейне, позволяющий устанавливать высоту падения капли. В качестве твердой поверхности использовалась стеклянная подложка. Полученный видеоматериал обрабатывался с помощью программного обеспечения EVERCAM SRV-HS.

Методика проведения эксперимента. Эксперименты проводились в изотермических условиях при температуре 23 °C.

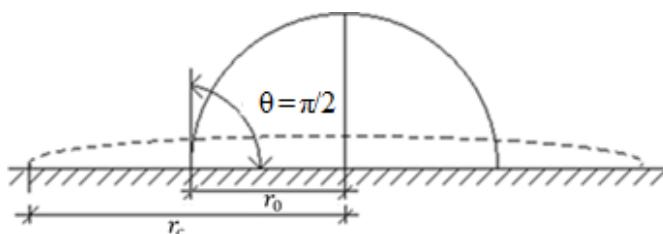
Водные растворы полимера тщательно перемешиваются в емкости и заправляются в цилиндр пипеточного дозатора. Пипеточный дозатор с помощью кронштейна координатным способом устанавливается на требуемую высоту 0,4 см над стеклянной подложкой. На поверхность подготовленной подложки (сразу после обработки этиловым спиртом и ее высушивания) выдавливается пробная капля раствора полимера, по которой осуществляется фокусировка макрообъектива видеокамеры. Для этой цели рядом с каплей устанавливается миллиметровая шкала, служащая также масштабом для оценки габаритов капли. После окончательной настройки видеокамера жестко фиксируется зажимными винтами, что позволяет соблюдать неизменность фокусного расстояния макрообъектива.

Для рассмотрения динамики растекания капли по поверхности подложки опыт выполнялся по следующему алгоритму: включается видеокамера со скоростью 7047 к/с и через 1–2 с выдавливается на подложку исследуемая капля. В момент отрыва капли от полимерного наконечника пипеточного дозатора с помощью пиксельной цифровой линейки программного обеспечения MySizee замеряется радиус падающей капли. В таблице 1 приведены результаты измеренных радиусов капли.

Таблица 1. – Радиусы капель водных растворов полимера и капли воды

Раствор	Радиус капли r_k , см
Вода	$0,151 \pm 0,002$
0,01 %-й раствор ПАМ	$0,151 \pm 0,002$
0,05 %-й раствор ПАМ	$0,140 \pm 0,002$
0,1 %-й раствор ПАМ	$0,139 \pm 0,002$
0,5 %-й раствор ПАМ	$0,136 \pm 0,002$

Момент касания капли с подложкой фиксируется видеокамерой и в течение 10 с фотографируется процесс растекания. Далее видеоматериал экспортируется и обрабатывается в программе EVERCAM SRV-HS. Продолжительность растекания капли рассматривалась с момента образования краевого угла $\theta = \pi/2$ (когда капля приобретала форму полусферы) и до полного прекращения ее растекания. На рисунке 2 представлена схема растекания капли водного раствора.



r_c – радиус предельного растекания исследуемой капли; r_0 – радиус капли при $\theta = \pi/2$
Рисунок 2. – Схема растекания капли водного раствора

¹ Высокоскоростные камеры Evercam // Evercam High speed technologies: [сайт]. – URL: <https://evercam.ru> (дата обращения: 06.04.2025).

² Дозаторы пипеточные механические Thermo Scientific. Технические характеристики // Лабораторные и весовые системы: [сайт]. – URL: <https://www.lvs.by/catalog/dosing/pipette/dozatory-mekhanicheskie-thermo-scientific-lenpipet-marka-blek307/?ysclid=m95outhqrb643271648> (дата обращения: 06.04.2025).

При конвертации пикселей в сантиметры замеренных радиусов капель учитывалось разрешение видеокадра PPI, а также расстояние макрообъектива до места их растекания. Эксперименты повторялись минимум 5 раз для проверки воспроизводимости результатов.

Значения радиусов исследуемых капель регистрировались с шагом экспозиции по времени 0,005 с до полного прекращения растекания. Графики зависимости радиусов капель водных растворов ПАМ и кипяченой воды от времени представлены на рисунке 3.

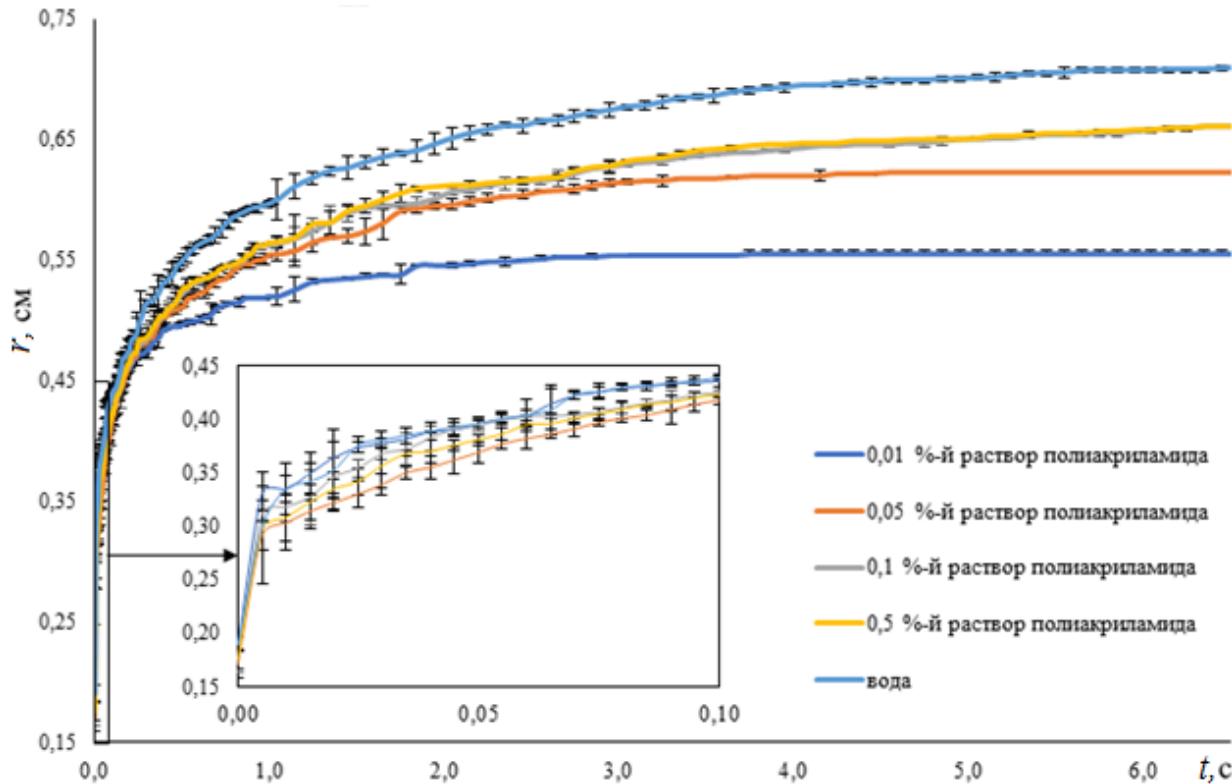
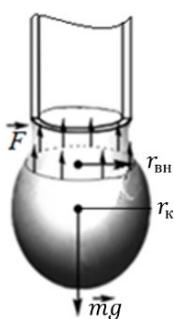


Рисунок 3. – График зависимости радиусов капель водных растворов ПАМ и кипяченой воды от времени

Методика определения коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{жг}$. Определение коэффициента поверхностного натяжения водных растворов полимера и кипяченой воды проводилось по методу отрыва капель из узкой вертикально расположенной трубы. Схема отрыва капли из вертикально расположенной трубы изображена на рисунке 4.



F – сила поверхностного натяжения;
 mg – сила тяжести; $r_{вн}$ – внутренний радиус полимерного наконечника дозатора пипетки; r_k – радиус капли

Рисунок 4. – Схема отрыва капли из узкой вертикально расположенной трубы

В момент отрыва капли сила поверхностного натяжения F равна силе тяжести mg . Коэффициент поверхностного натяжения определяем по формуле:

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r_{вн}}, \quad (1)$$

где m – масса исследуемой капли, г;

g – ускорение свободного падения, принятое равным 979,1 см/с²;

$r_{вн}$ – внутренний радиус полимерного наконечника дозатора пипетки, см.

В качестве узкой вертикально расположенной трубы в эксперименте использовался полимерный наконечник пипеточного дозатора с внутренним диаметром $D_{вн} = 0,066$ см. Объемы капель высчитывались исходя из радиусов исследуемых

капель r_k (см), указанных в таблице 1, по формуле $V = 4\pi r_k^3 / 3$. Для определения массы исследуемой капли жидкости плотностью ρ (г/см³) применялась формула $m = V\rho$. Измерение

плотности каждой исследуемой жидкости замерялось вискозиметром Штабингера SVM 300 Anton Paar³. Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Сведения по объему, плотности и поверхностному натяжению капель водных растворов ПАМ и капли воды

Раствор	Объем капли V , см ³	Плотность ρ , г/см ³	Поверхностное натяжение σ , г/с ²
Вода	$0,0144 \pm 0,0006$	$0,996 \pm 0,002$	$68,2 \pm 0,4$
0,01 %-й раствор ПАМ	$0,0144 \pm 0,0006$	$0,997 \pm 0,002$	$68,2 \pm 0,4$
0,05 %-й раствор ПАМ	$0,0115 \pm 0,0005$	$0,997 \pm 0,002$	$54,6 \pm 0,4$
0,1 %-й раствор ПАМ	$0,0112 \pm 0,0005$	$0,997 \pm 0,002$	$53,0 \pm 0,4$
0,5 %-й раствор ПАМ	$0,0105 \pm 0,0005$	$0,997 \pm 0,002$	$50,0 \pm 0,4$

Методика определения равновесного краевого угла θ_c . Для определения равновесного краевого угла растекающейся капли жидкости применяется формула:

$$\theta_c = \frac{8}{3R_c}, \quad (2)$$

которая получается из уравнения (5) при малых равновесных углах θ_c , путем разложения функции $\operatorname{tg}(\theta_c/2)$ в ряд. Здесь R_c – безразмерный радиус, который принимает капля по окончании растекания. Для его нахождения используется формула $R_c = r_c / r_0$, где $r_0 = \sqrt[3]{3V / (2\pi)}$ – радиус основания капли, имеющей форму полусферы, r_c – радиус, который принимает капля по окончании растекания. Результаты вычислений представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Вычисленные параметры радиусов и равновесных краевых углов растекания капель водных растворов ПАМ и воды

Раствор	r_0 , см	r_c , см	R_c	θ_c , рад
Вода	$0,190 \pm 0,002$	$0,555 \pm 0,002$	$2,92 \pm 0,03$	$0,107 \pm 0,004$
0,01 %-й раствор ПАМ	$0,190 \pm 0,002$	$0,710 \pm 0,002$	$3,73 \pm 0,04$	$0,051 \pm 0,002$
0,05 %-й раствор ПАМ	$0,176 \pm 0,002$	$0,661 \pm 0,002$	$3,75 \pm 0,04$	$0,050 \pm 0,002$
0,1 %-й раствор ПАМ	$0,174 \pm 0,002$	$0,661 \pm 0,002$	$3,79 \pm 0,05$	$0,049 \pm 0,002$
0,5 %-й раствор ПАМ	$0,171 \pm 0,002$	$0,623 \pm 0,002$	$3,64 \pm 0,04$	$0,055 \pm 0,002$

Методика определения вязкости ν при малых скоростях сдвига жидкости и его плотности ρ . Вязкость ν при малых скоростях сдвига находилась опытным путем с помощью стеклянного капиллярного вискозиметра ВПЖ-2⁴, соответствующего ГОСТ 10028-81⁵, динамическая вязкость – вискозиметром Штабингера SVM 300 Anton Paar⁶.

Перед каждым определением кинематической вязкости жидкости для разных растворов полимера вискозиметр ВПЖ-2 был тщательно промыт и высушен. Вначале вискозиметр ВПЖ-2 несколько раз промывался бензином, затем петролейным эфиром. После растворителя промывался водой и заливался не менее чем на 5–6 ч хромовой смесью. После этого вискозиметр промывался дистиллированной водой и высушивался.

Измерение времени проводилось с помощью измерителя темпа электронного Электроника ИТ-01⁷.

Измерение кинематической вязкости с помощью капиллярного вискозиметра основано на определении времени истечения через капилляр определенного объема жидкости из измерительного резервуара.

³ Вискозиметры // СВМ ЛАБ: [сайт]. – URL: <https://svm-lab.ru/product-category/lab-equipment/viskozimetry> (дата обращения: 06.04.2025).

⁴ Вискозиметр капиллярный стеклянный ВПЖ-2. Паспорт // Сайт группы компаний «ЭКРОС». – URL: https://ecohim.ru/files/project_4845/Viskozimetr_VPZH-2_pasport_print.pdf (дата обращения: 30.06.2025).

⁵ Вискозиметры капиллярные стеклянные. Технические условия: ГОСТ 10028-81. – Введ. 01.01.1983. – Москва: Межгосударственный стандарт, 2005. – 31 с.

⁶ См. сноска 3.

⁷ Индикаторы темпа электронные Электроника ИТ-01 // All-pribors.ru: Приборы и средства измерений: [сайт]. – URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/13029-89-elektronika-it-01-3929?ysclid=m972tda63t287668616> (дата обращения: 06.04.2025).

Кинематическая вязкость рассчитывалась согласно паспорту вискозиметра ВПЖ-2⁸ по среднему времени истечения жидкости по формуле:

$$\nu = \frac{g}{980,7} TK, \quad (3)$$

где $980,7 \text{ см}^2/\text{с}^2$ – размерный коэффициент;
 $K = 0,3118 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}^2$ – постоянная вискозиметра;
 T – время истечения жидкости, с.

Полученные результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Кинематическая и динамическая вязкость

Раствор	Кинематическая вязкость ν , Ст [в СГС] = см ² /с [в СИ]	Динамическая вязкость μ	
		П [в СГС] = г/(см·с) [в СИ]	мПа·с [в СИ]
Вода	$0,0097 \pm 0,0001$	$0,00970 \pm 0,00003$	$0,970 \pm 0,003$
0,01 %-й раствор ПАМ	$0,0104 \pm 0,0001$	$0,01010 \pm 0,00003$	$1,010 \pm 0,003$
0,05 %-й раствор ПАМ	$0,0110 \pm 0,0001$	$0,01090 \pm 0,00003$	$1,090 \pm 0,003$
0,1 %-й раствор ПАМ	$0,0138 \pm 0,0001$	$0,01370 \pm 0,00003$	$1,370 \pm 0,003$
0,5 %-й раствор ПАМ	$0,0148 \pm 0,0001$	$0,01470 \pm 0,00005$	$1,470 \pm 0,003$

Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами. Основу теоретических расчетов кинетики растекания капли воды и водного раствора полимера выполняла система уравнений (4) и (5), полученная авторами в работе [4]:

$$\frac{dR}{d\bar{\tau}} = \left(\frac{\sin \theta - \sin \theta_c}{R} \right)^{\frac{1}{n}} (\cos \theta_c - \cos \theta)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$$\frac{4}{R^3} = 3 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + \operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2}, \quad \frac{4}{R_c^3} = 3 \operatorname{tg} \frac{\theta_c}{2} + \operatorname{tg}^3 \frac{\theta_c}{2}, \quad (5)$$

где $R = r_1 / r_0$, r_1 – внутренний радиус капли [4, с. 313].

Отметим, что для ньютоновских жидкостей, к которым относятся вода и рассмотренные растворы ПАМ, показатель неильтоновского поведения $n = 1$ [5, с. 8]. Кроме того, внутренний радиус капли r_1 [4] можно считать в условиях эксперимента равным радиусу растекания капли r (см). Поэтому в эксперименте уравнение (4) приняло вид

$$\frac{dR}{d\bar{\tau}} = \frac{\sin \theta - \sin \theta_c}{R} (\cos \theta_c - \cos \theta)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Расчеты проводились путем численного решения системы уравнений (6) и (5) с начальными условиями $\theta = \pi/2$, $R = 1$ при $\bar{\tau} = 0$ с учетом вычисленных в таблице 3 значений равновесных краевых углов θ_c . Безразмерные радиус R и время $\bar{\tau}$ определялись по формулам [1]:

$$R = r / r_0, \quad \bar{\tau} = \frac{2\sigma}{3\alpha\mu} \left(\frac{2\pi}{3V} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{2\sigma}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} t, \quad (7)$$

где α – безразмерный коэффициент, численное значение которого $\alpha = |\rho g / \sigma|$ [1; 4];

t – время растекания исследуемой капли, с.

Указанные начальные условия объясняются тем, что растекание капель рассматривается с момента времени $\bar{\tau} = 0$, когда образуется краевой угол $\theta = \pi/2$ и капля приобретает форму полусферы, что соответствует безразмерному радиусу растекания $R = 1$.

Численная обработка полученных результатов проводилась в пакете Mathcad. На рисунке 5 представлены графики кинетики растекания капли жидкости по твердой поверхности, полученные экспериментально и теоретически. Как видно из рисунков, теоретические и экспериментальные кривые качественно согласуются между собой. На поздних стадиях

⁸ См. сноску 4.

растекания капли, когда несущественны инерционные члены в уравнениях движения, теоретические и экспериментальные кривые хорошо согласуются между собой.

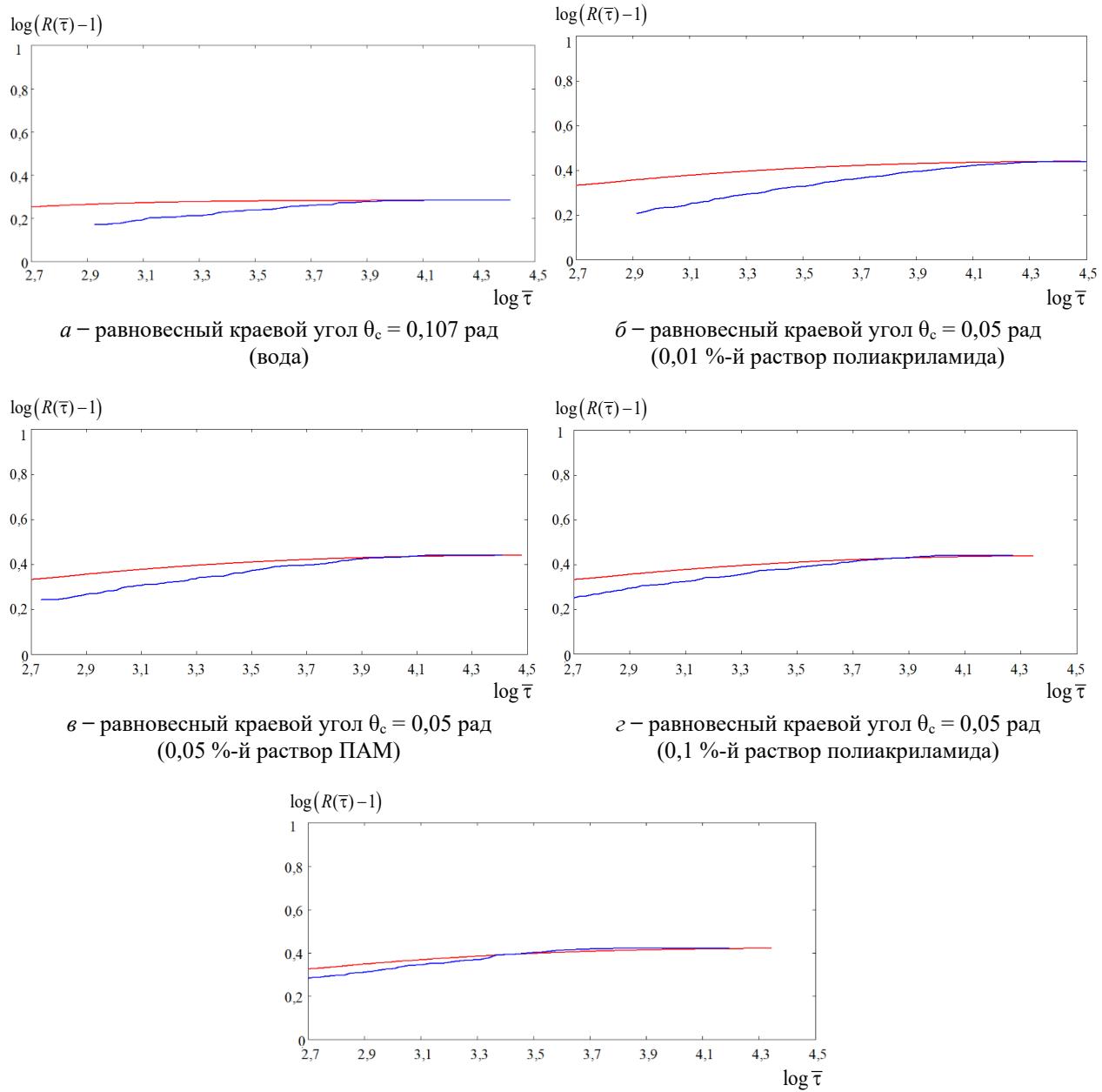


Рисунок 5. – Графики зависимости радиусов растекания капель воды и водных растворов ПАМ от времени для различных значений равновесного краевого угла θ_c по теоретическим (—) и экспериментальным (—) данным

Заключение

Таким образом, экспериментально исследована кинетика растекания капли кипящей воды и водных растворов полиакриламида по стеклянной горизонтальной поверхности. Установлено, что происходит ограниченное растекание капли до радиуса r_c , который соответствует равновесному краевому углу θ_c .

Опытным путем найдены: коэффициент поверхностного натяжения жидкости капли на границе с воздухом; вязкость ν при малых скоростях сдвига жидкости и ее плотность ρ ; равновесный краевой угол θ_c . Проведено сравнение экспериментальных и теоретических данных по кинетике растекания капли, позволяющее сделать вывод о качественной согласо-

ванными полученных результатов. Имеющееся расхождение между кривыми на ранних стадиях растекания капли обусловлено отсутствием при теоретическом рассмотрении инерционного члена в уравнениях движения капли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байков, В.И. Растекание капли жидкости по твердой горизонтальной поверхности / В.И. Байков, Е.В. Коробко, Н.А. Гончарова // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76, № 2. – С. 38–41.
2. Вавкушевский, А.А. Растекание капли вязкой жидкости по твердой горизонтальной поверхности / А.А. Вавкушевский [и др.] // Коллоидный журнал. – 1989. – Т. 51, № 3. – С. 439–444.
3. Коробко, Е.В. Растекание капли электрореологической суспензии во внешнем поле / Е.В. Коробко, Р.Г. Городкин, В.В. Мельниченко / Инженерно-физический журнал. – 1997. – Т. 70, № 5. – С. 766–770.
4. Байков, В.И. Растекание капли неильтоновской вязкой жидкости по твердой горизонтальной поверхности / В.И. Байков, Д.М. Нахай, Д.С. Миканович // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 3. – С. 312–324. – DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.312. – EDN: JCONHEB.
5. Каминер, А.А. Гидромеханика в инженерной практике / А.А. Каминер, О.М. Яхно. – Киев: Техника, 1987. – 174 с.

Растекание капель воды и водных растворов полимера по твердой горизонтальной поверхности

Spreading of water droplets and aqueous polymer solutions on a solid horizontal surface

Байков Валентин Иванович

доктор технических наук, доцент

Государственное научное учреждение
«Институт тепло- и массообмена имени
А.В. Лыкова Национальной академии наук
Беларусь», 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
ScopusID: 6602525113

Нахай Дмитрий Михайлович

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

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: eurotitaner@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5989-5465

SPREADING OF WATER DROPLETS AND AQUEOUS POLYMER SOLUTIONS ON A SOLID HORIZONTAL SURFACE

Baykov V.I., Nakhay D.M.

Purpose. To experimentally investigate and compare with theoretical calculations the kinetics of spreading of a drop of an aqueous solution of a polymer and boiled tap water on a horizontal solid surface.

Methods. Experimental studies.

Findings. The following were found experimentally: the coefficient of surface tension of a liquid drop at the boundary with air; viscosity at low shear rates of the liquid and its density; equilibrium contact angle. It was also established that there is a limited spreading of the droplet up to a radius that corresponds to the equilibrium contact angle. A comparison of theoretical and experimental data on the change in the droplet spreading radius over time was carried out, which showed that the results are in qualitative agreement with each other.

Application field of research. The obtained results are important for studying the dynamics of the process of extinguishing fires of solid materials with aqueous solutions of polyacrylamide of different concentrations.

Keywords: contact angle, equilibrium contact angle, surface tension coefficient, dynamic viscosity, kinematic viscosity.

(The date of submitting: April 25, 2025)

REFERENCES

1. Baikov V.I., Korobko E.V., Goncharova N.A. Spreading of a liquid droplet over a solid horizontal surface. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2003. Vol. 76, No. 2. Pp. 274–278. DOI: 10.1023/A:1023640831609.
2. Vavkushevskii A.A., Arslanov V.V., Stepanenko V.Yu., Ogarev V.A. Spreading of viscous liquid drop on solid horizontal surface. *Colloid Journal of the USSR*, 1989. Vol. 51, No. 3. Pp. 379–383. EDN: XOASZP.
3. Korobko E.V., Gorodkin R.G., Mel'nichenko V.V. Spreading of a drop of an electrorheological suspension in an external field. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1997. Vol. 70, No. 5. Pp. 763–768. DOI: 10.1007/BF02657635.
4. Baykov V.I., Nakhay D.M., Mikanovich D.S. Rastekanie kapli nen'yutonovskoy vyazkoy zhidkosti po tverdogorizontálnoy poverkhnosti [Spreading of a drop of non-Newtonian viscous liquid over a solid horizontal surface]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 3. Pp. 312–324. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.312. EDN: JCOHEB.
5. Kaminer A.A., Yakhno O.M. Gidromekhanika v inzhenernoy praktike [Hydromechanics in engineering practice]. Kiev: Tekhnika, 1987. 174 p.

Copyright © 2025 Baykov V.I., Nakhay D.M.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.