

Научная статья

УДК 661.174+66.022.387

doi: 10.34987/2712-9233.2025.42.26.007

## Исследование кинетики растекания полимерных растворов

*Дмитрий Михайлович Нахай*

*Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск*

*Автор ответственный за переписку: Денис Викторович Криваль den.kryval@mail.ru*

**Аннотация.** Установлено, что при равновесном краевом угле  $\theta_c = 0$  кинетика перемещения периметра капли неньютоновской жидкости изменяется от зависимости безразмерного радиуса  $R$  растекающейся капли от безразмерного времени  $\tau$  растекания капли ( $R \sim \tau$ ) в области тупых краевых углов  $\theta > \pi/2$  до зависимости  $R \sim \tau^{n/4(1+n)}$  в области острых краевых углов  $\theta < \pi/2$ .

**Ключевые слова:** равновесный краевой угол, краевой угол, пристенный эффект скольжения

**Для цитирования:** Нахай Д.М. Исследование кинетики растекания полимерных растворов // Актуальные проблемы безопасности в техносфере 2025. № 2(18) С. 37-42 URL:<https://doi.org/10.34987/2712-9233.2025.42.26.007>

## Investigation of the kinetics of polymer solution spreading

*Dmitry M. Nahai*

*University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk*

*Corresponding author: Denis V. Kryval den.kryval@mail.ru*

**Abstract.** It is established that at an equilibrium edge angle  $\theta_c = 0$ , the kinetics of displacement of the perimeter of a non-Newtonian liquid droplet varies from the dependence of the dimensionless radius  $R$  of the spreading droplet on the dimensionless spreading time ( $R \sim \tau$ ) in the region of obtuse edge angles  $\theta > \pi/2$  to the dependence  $R \sim \tau^{n/4(1+n)}$  in the area of sharp edge angles  $\theta < \pi/2$ .

**Keywords:** equilibrium edge angle, edge angle, wall sliding effect.

**For citation:** Nahai D.M. Investigation of the kinetics of Polymer Solution Spreading // Actual problems of safety In the technosphere 2025. No. 2 (18). P. 37-42. URL:<https://doi.org/10.34987/2712-9233.2025.42.26.007>

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

Эти добавки изменяют реологическое поведение воды, превращая ее в неньютоновскую жидкость, хорошо описываемую степенным реологическим уравнением [1]:

$$\tau = k \left| \frac{dv}{dz} \right|^{n-1} \frac{dv}{dz} \quad (1)$$

где:

$\tau$  – напряжение сдвига,

$k$  – коэффициент консистенции жидкости,

$n$  – показатель неньютоновского поведения ( $n \leq 1$ ),

$\frac{dv}{dz}$  – скорость сдвига.

Для подачи воды при тушении пожара используют пожарные стволы или оросители, которыми можно создавать сплошные, капельные, распыленные и мелкораспыленные водяные струи, т.е. потоки воды, состоящие из мелких капель. При горении твердых материалов основную роль в пожаротушении играет охлаждение поверхности. Поэтому чрезвычайно важно знать поведение капель на твердых поверхностях, окружающих очаг горения, поскольку, попадая на твердую поверхность, капля растекается по ней и испаряется, тем самым создавая охлаждающий эффект.

### Основная часть

Дадим описание процесса растекания капли неньютоновской жидкости по твердой горизонтальной поверхности, взяв за основу идею, изложенную в работе [5].

Результаты экспериментов [6, 7] показывают, что капля жидкости при растекании имеет форму, схематически изображенную на рисунке 1. Большая (центральная) часть капли сохраняет форму, близкую к шаровому сегменту, и ограничена выпуклой поверхностью с краевым углом  $\theta$ . На периферии капли образуется зона динамического мениска, имеющая вогнутую поверхность с краевым углом, близким к равновесному  $\theta_c$ . Такой вид внешней поверхности капли свидетельствует о равномерном распределении давления в основной (центральной) части и его перераспределении в зоне динамического мениска относительно твердой поверхности, т.е. центральную часть капли считаем неподвижной по сравнению со скоростью перемещения динамического мениска. Давление жидкости на входе в динамический мениск полагаем равным давлению в центральной части капли:

$$p = \frac{2\sigma}{r_1} \times \sin \theta \quad (2)$$

где:

$\sigma$  – поверхностное натяжение,

$r_1$  – внутренний радиус капли,

$\theta$  – краевой угол,

$p$  – давление в капле.

Давление вблизи внешней границы динамического мениска и твердой поверхности считаем близким к равновесному значению:

$$p_c = \frac{2\sigma}{r_2} \times \sin \theta_c ,$$

где:

$r_2$  – внешний радиус капли.

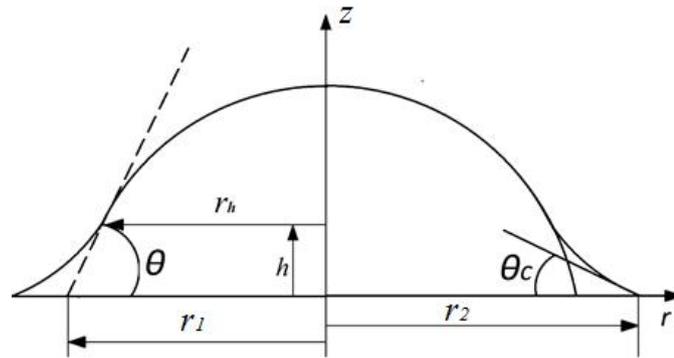


Рис. 1. Схема растекания капли

$r_{1,2}$  – радиусы капли,  $\theta$  – краевой угол,  $\theta_c$  – равновесный краевой угол,  
 $h$  – высота динамического мениска,  $z$  и  $r$  – продольная и радиальная координаты,  
 $r_h$  – радиальная координата поверхности динамического мениска.

Найдем высоту капли  $h_1 = h(r_1)$  на входе в зону динамического мениска. На свободной поверхности динамического мениска касательное напряжение трения равно нулю (см. (10)). Поэтому его форма определяется поверхностным натяжением  $\sigma$  и действующей на единицу объема силой тяжести  $\rho g$ . Тогда для нахождения формы поверхности мениска можно использовать уравнение статического мениска:

$$\frac{d^2 r_h}{dz^2} \left[ 1 + \left( \frac{dr_h}{dz} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} = \frac{\rho g z}{\sigma} \quad (3)$$

с граничными условиями:

$$\frac{dr_h}{dz} = -ctg \theta_c \text{ при } z = 0, \quad \frac{dr_h}{dz} = -ctg \theta \text{ при } z = h_1 \quad (4)$$

Однократное интегрирование соотношения (3) дает:

$$\frac{dr_h}{dz} \left[ 1 + \left( \frac{dr_h}{dz} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} = \frac{\rho g}{2\sigma} \times z^2 + C \quad (5)$$

где:

$C$  – постоянная интегрирования. Из формулы (5), с учетом граничных условий (4), находим высоту  $h_1$  капли на входе в зону динамического мениска:

$$h_1 = \left( \frac{2\sigma}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \times (\cos \theta_c - \cos \theta)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

где:

длина  $\left( \frac{2\sigma}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}}$  представляет собой капиллярную постоянную. Величина  $h_1$ , является характерным размером зоны динамического мениска

Система уравнений с единых позиций описывает кинетику растекания капли неньютоновской жидкости в области как острых ( $\theta < \pi/2$ ) углов, так и тупых углов ( $\theta > \pi/2$ ). Чтобы в этом убедиться, введём безразмерные переменные:

– безразмерный радиус:  $R = r_1/r_0$ , где  $r_0 = (3V/2\pi)^{1/3}$  – радиус основания капли, когда она имеет форму полусферы;

– безразмерное время.

Интегрируя уравнение (6) с начальным условием  $R=R_0$  при  $\bar{t} = 0$ , находим:

$$R \frac{4(1+n)}{n} - R_0 \frac{4(1+n)}{n} = 2^{\frac{3}{2}} \left( \frac{1+n}{n} \right) \left( \frac{8}{3} \right)^{\frac{1+n}{n}} \bar{\tau} \quad (7)$$

Соотношение (7) при  $R \frac{4(1+n)}{n} \gg R_0 \frac{4(1+n)}{n}$  позволяет записать:

$$R = \left[ 2^{\frac{3}{2}} \left( \frac{1+n}{n} \right) \left( \frac{8}{3} \right)^{\frac{1+n}{n}} \right]^{\frac{n}{4(1+n)}} \times \bar{\tau}^{\frac{n}{4(1+n)}} \quad (8)$$

которое для ньютоновской жидкости  $n=1$  принимает вид:

$$R = 1,587 \bar{\tau}^{1/8}. \quad (9)$$

Как показано в работе [5], формула (9) удовлетворительно описывает многочисленные экспериментальные данные [6,7,8] если коэффициент пропорциональности  $a$  в соотношении (5) положить численно равным величине:

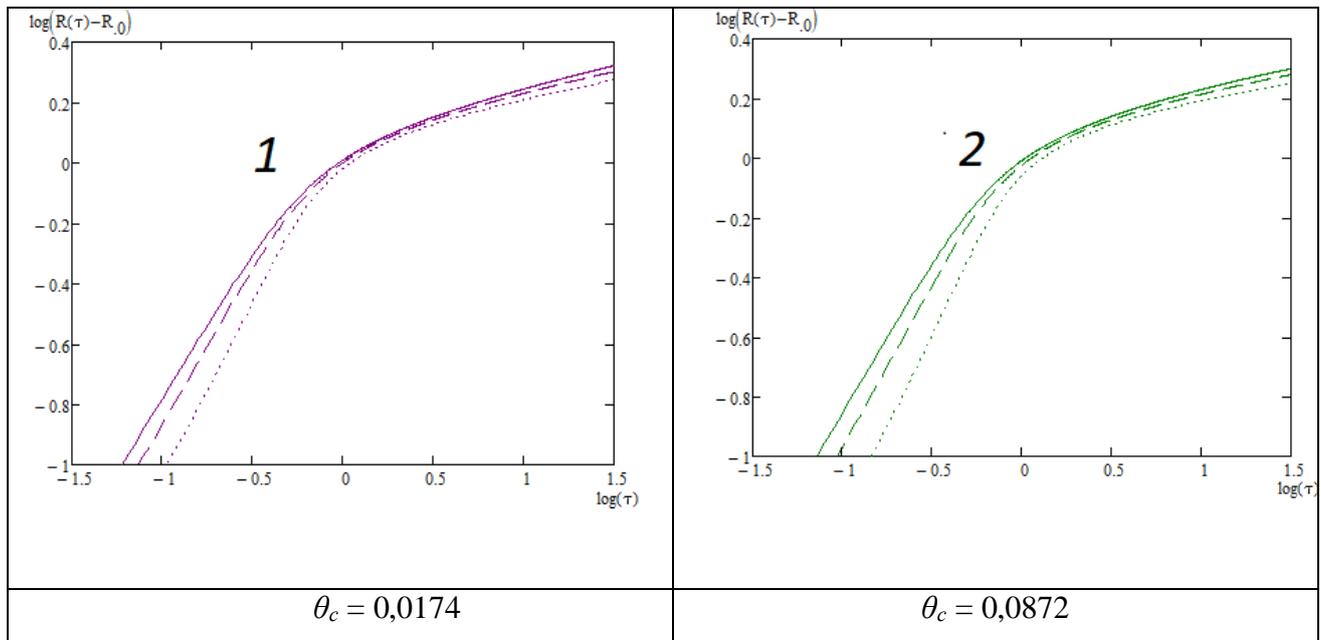
$$a = \left| \frac{\rho g}{\sigma} \right|$$

$$\bar{\tau} = \frac{n}{2n+1} \left( \frac{2\pi}{3V} \right)^{\frac{1+n}{3n}} \left( \frac{2\sigma}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{2\sigma}{ak} \right)^{\frac{1}{n}} t$$

Тогда систему уравнений (4), (5) в безразмерном виде представим как:

$$\frac{dR}{d\bar{\tau}} = \left( \frac{\sin\theta - \sin\theta_c}{R} \right)^{\frac{1}{n}} (\cos\theta_c - \cos\theta)^{\frac{1}{2}}, \quad \frac{4}{R^3} = 3 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + \operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2}$$

На рисунке 2 представлены графики кинетики растекания капли неньютоновской жидкости по твёрдой поверхности, полученные путём численного решения системы уравнений (6) для различных значений показателя неньютоновской поведения  $n$  и равновесного краевого угла  $\theta_c$ .



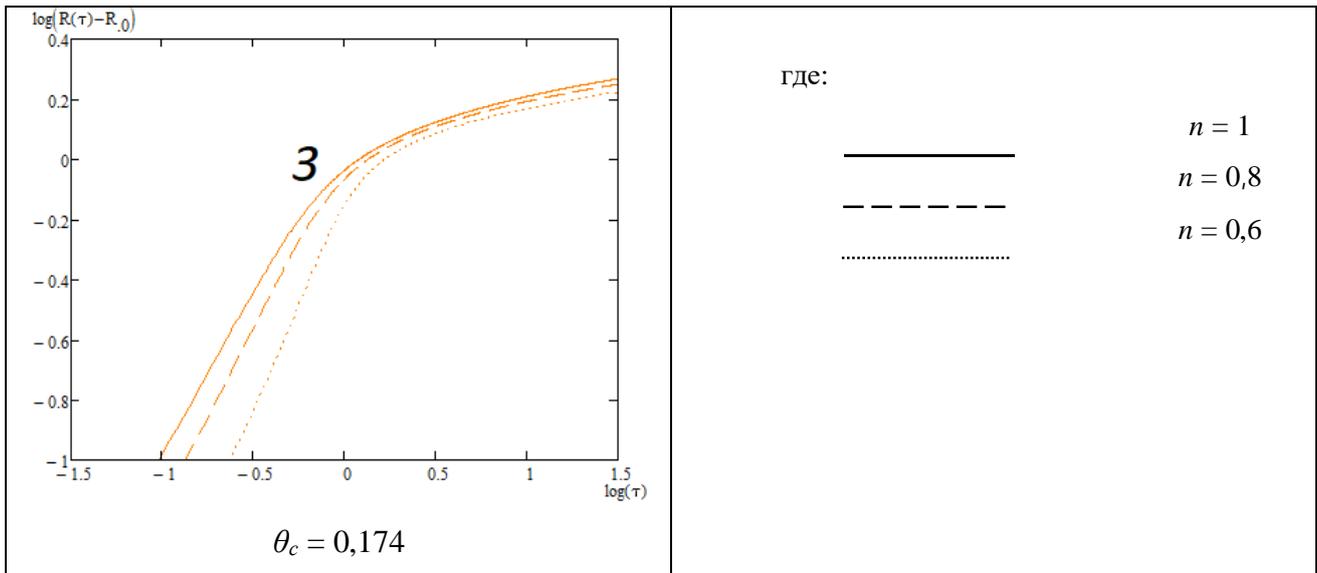


Рис. 2. Кинетика растекания капли

### Заключение

Таким образом, разработана теоретическая модель процесса растекания капли неньютоновской жидкости по твердой поверхности. Установлено, что при равновесном краевом угле  $\theta_c = 0$  кинетика перемещения периметра капли неньютоновской жидкости изменяется от зависимости безразмерного радиуса  $R$  растекающейся капли от безразмерного времени  $\tau$  растекания капли ( $R \sim \tau$ ) в области тупых краевых углов  $\theta > \pi/2$  до зависимости  $R \sim \tau^{n/4(1+n)}$  в области острых краевых углов  $\theta < \pi/2$ . Результат получен с единых позиций и хорошо согласуется с многочисленными экспериментальными данными для ньютоновской жидкости ( $n=1$ ) [6-8].

### Список использованных источников

1. Берд, Р.Б. Явления переноса / Р.Б. Берд, В.Е. Стьюарт, Е.Н. Лайтфут – М.: Химия, 1974. – 688 с.
2. 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. 166–176. – DOI 10.33408/2519-237X.2019.3-2.166.
3. Нахай, Д.М. Влияние скорости сдвига и температуры на динамическую вязкость раствора полимеров / Д.М. Нахай, Д.С. Миканович, М.О. Бусел М.О. // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2023. – Т.7, № 2. – С. 215–222. – DOI 10.33408/2519-237X.2023.7-2.215.
4. Нахай, Д.М. Особенности подъема неньютоновских жидкостей в пористом материале / Д.М. Нахай, Д.С. Миканович, В.И. Байков В.И. // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2023. – Т.8, № 1. – С. 98–105. – DOI 10.33408/2519-237X.2024.8-1.98.
5. 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.
6. Вавкушевский А.А. Растекание капли вязкой жидкости по твердой горизонтальной поверхности / А.А. Вавкушевский, В.В. Арсланов, В.Ю. Степаненко, В.А. Огарев / Коллоид. Журн. – 1989 – Т.51 №3. – С. 439-444.
6. 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.
7. Рауд Э.А. Капиллярная модель процесса растекания / Э.А. Рауд, Б.Д. Сумм //Адгезия расплавов и пайка материалов. – 1984. – вып.12. - С. 3-7.

Статья поступила в редакцию 26.03.2025; одобрена после рецензирования 27.05.2025; принята к публикации 20.06.2025.

The article was submitted 26.03.2025, approved after reviewing 27.05.2025, accepted for publication 20.06.2025.