



### Автоматизированный расчет параметров полимерных оторочек при использовании тейперинга Automated calculation of polymer slugs parameters during tapering

В докладе предполагается изложить подходы к оценке скорости роста зоны смешивания на границе двух оторочек разной вязкости при смешивающемся вытеснении. Классические модели Коваля и Тодда–Лонгстафа не всегда дают удовлетворительный результат и не допускают разумного включения адсорбции в параметры модели. Альтернативный подход основан на модели TFE (transverse flow equilibrium), которая позволяет оценить скорости исходя из свойств полимера. Соответствующие оценки приводят к возможности расчета параметров полимерных оторочек при учете использования технологии постепенного понижения вязкости, что, в свою очередь, позволяет уменьшить издержки применения технологии, путем экономии объема закачиваемого полимера.

We plan to present some approaches to estimating the growth rate of the mixing zone at the boundary of two slugs with different viscosities in case of mixing displacement. The classical Koval and Todd–Longstaff models do not always give a satisfactory result and do not allow reasonable inclusion of adsorption in the model parameters. An alternative approach is based on the TFE (transverse flow equilibrium) model, which makes it possible to estimate the rates based on the properties of the polymer. Appropriate estimates lead to the possibility of calculating the parameters of polymer slugs during the use of technology of gradual viscosity bancs, which, in turn, reduces the costs of using the technology by saving the volume of injected polymer.

**Бахарев Федор Львович (Fedor Bakharev)**  
к.ф.-м.н., с.н.с., СПбГУ (SPBSU)

Громан Андрей Андреевич, рук. техн. офиса, ГПН  
Енин Александр Иванович, инж.-иссл., СПбГУ  
Калинин Константин Михайлович, инж.-иссл.,  
СПбГУ  
Петрова Юлия Петровна, н.с., СПбГУ  
Растегаев Никита Владимирович, н.с., СПбГУ  
Тихомиров Сергей Борисович, проф., СПбГУ



# Прорыв полимерной оторочки

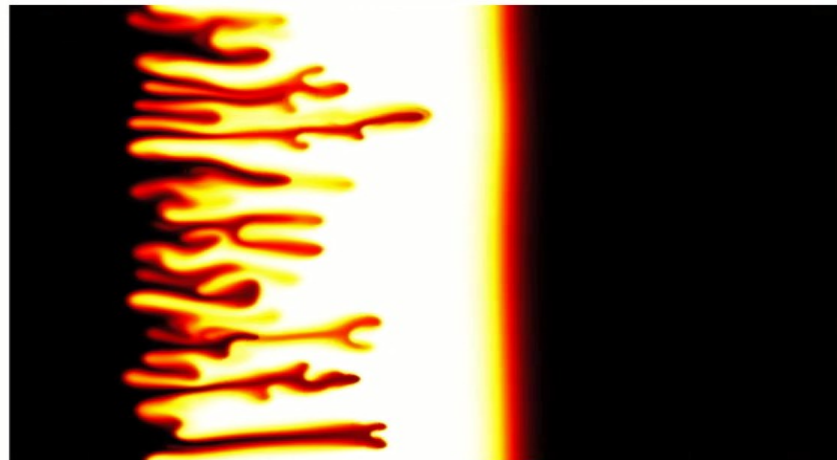


- **Химические МУН:**

- Полимерное заводнение
- SP заводнение
- ASP заводнение



- Слабонеоднородная пористая среда
- Неустойчивость возникает из-за разницы вязкостей
- После прорыва полимерной оторочки эффект МУН снижается

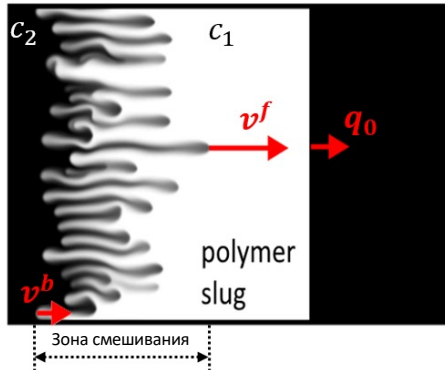


## Основные вопросы:

Какой выбирать размер оторочки?

Как уменьшить количество полимера?

# Скорость роста зоны смешивания



Как определить скорость роста зоны смешивания?

- Полевой эксперимент
- Лабораторный эксперимент
- Численное моделирование
- Аналитические формулы

$q_0$  – скорость устойчивого фронта. Возьмем  $q_0 = 1$

$v^f$  – скорость переднего края зоны смешивания **постоянна** [1]

$v^b$  – скорость заднего края зоны смешивания **постоянна** [1]

$c_1$  – концентрация закаченного полимера

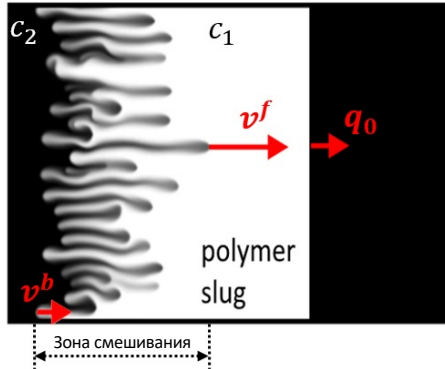
$c_2$  – уменьшенная концентрация закаченного полимера

(для одной оторочки  $c_2 = 0$  – закачка воды)

- $v^f$  и  $v^b$  являются функцией от  $M = \frac{\mu(c_1)}{\mu(c_2)}$  или кривой вязкости  $\mu(c)$

[1] *Nijjer, J.S., Hewitt, D.R. and Neufeld, J.A., 2018. The dynamics of miscible viscous fingering from onset to shutdown*

# Скорость роста зоны смешивания



$q_0$  – скорость устойчивого фронта. Возьмем  $q_0 = 1$

$v^f$  – Скорость заднего фронта зоны смешивания **постоянна** [1]

$v^b$  – Скорость переднего фронта зоны смешивания **постоянна** [1]

## Эмпирические модели скоростей

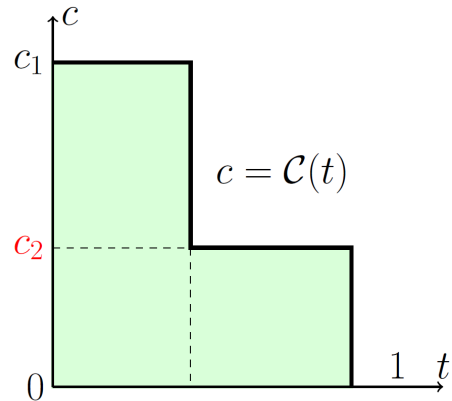
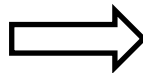
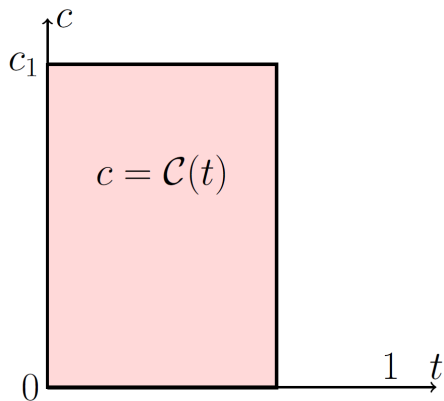
- Усреднение- «эффективная вязкость»  $M_e$ :
  - Koval (1963)
  - Todd-Longstaff (1972)
- Transverse Flow Equilibrium (TFE) – Модель трансверсального потока Otto-Menon, Yortsos-Salin (2006)
  - $p(x, y) = p(x)$
  - $M = \frac{\mu(c_1)}{\mu(c_2)} > 1$  – отношение вязкостей

Koval	$v^f = M_e \quad v^b = \frac{1}{M_e} \quad M_e = \left( \alpha \cdot M^{\frac{1}{4}} + (1 - \alpha) \right)^4$
Todd-Longstaff	$v^f = M_e \quad v^b = \frac{1}{M_e} \quad M_e = M^\omega$
TFE	$v^f \leq \frac{\bar{m}(c_1, c_2)}{m(c_2)}, \quad v^b \geq \frac{\bar{m}(c_1, c_2)}{m(c_1)},$ $m(c) = \frac{1}{\mu(c)}, \quad \bar{m}(c_1, c_2) = \frac{\int_{c_1}^{c_2} m(c)}{c_2 - c_1}$

# Основная идея



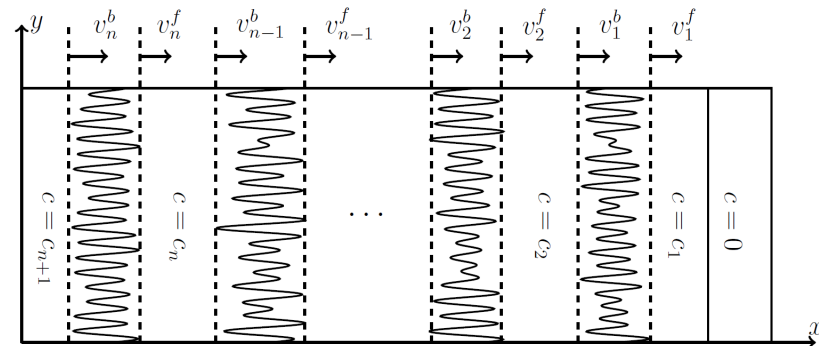
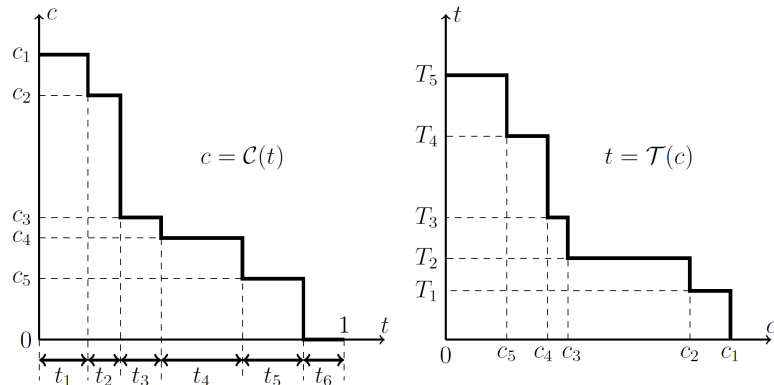
Закачка двух оторочек может дать выигрыш в массе полимера (Claridge, 1978)



$$V_{\text{red}} > V_{\text{green}}$$

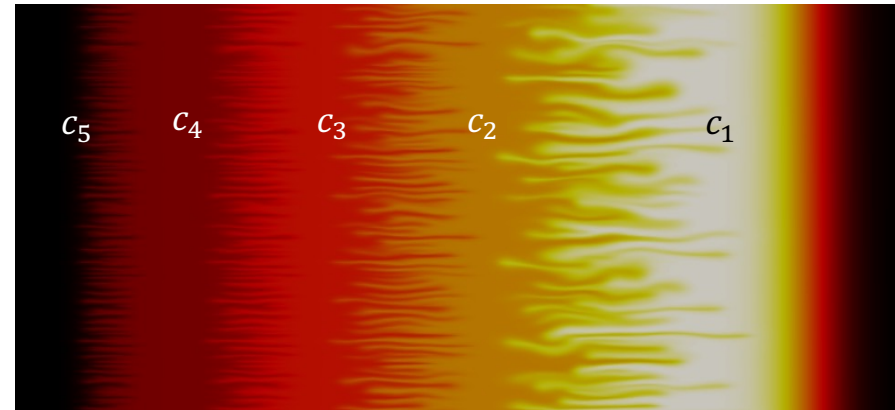
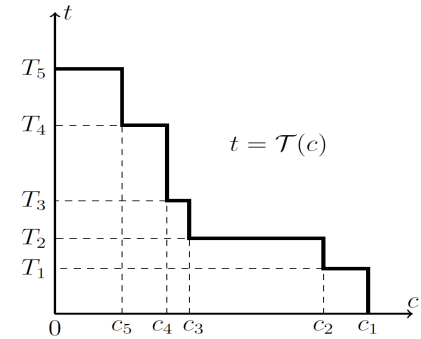
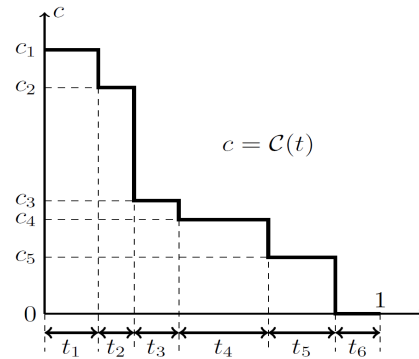
# Постановка задачи

- Задача: уменьшить количество полимера
- Стратегия: Постепенное понижение вязкости (graded viscosity banks, GVB, tapering) Claridge (1978)
- Мы хотим отсутствие порыва во всех оторочках
- По данным концентрациям  $c_n$  и скоростям  $v^b, v^f$  мы можем найти размер оторочки  $t_n$ , гарантирующей отсутствие прорыва
- Выберем концентрации  $c_n$ , минимизирующие количество полимера
 
$$V_n = \sum_{i=1}^n c_i t_i \rightarrow \min$$
- Задача:
  - $n$  – малое ( $n = 2, 3, 5$ )
  - $n \rightarrow \infty$



# Постановка задачи

- Задача: уменьшить количество полимера
- Стратегия: Постепенное понижение вязкости (graded viscosity banks, GVB, tapering) Claridge (1978)
- Мы хотим отсутствие порыва во всех оторочках
- По данным концентрациям  $c_n$  и скоростям  $v^b, v^f$  мы можем найти размер оторочки  $t_n$ , гарантирующей отсутствие прорыва
- Выберем концентрации  $c_n$ , минимизирующие количество полимера
$$V_n = \sum_{i=1}^n c_i t_i \rightarrow \min$$
- Задача:
  - $n$  – малое ( $n = 2, 3, 5$ )
  - $n \rightarrow \infty$



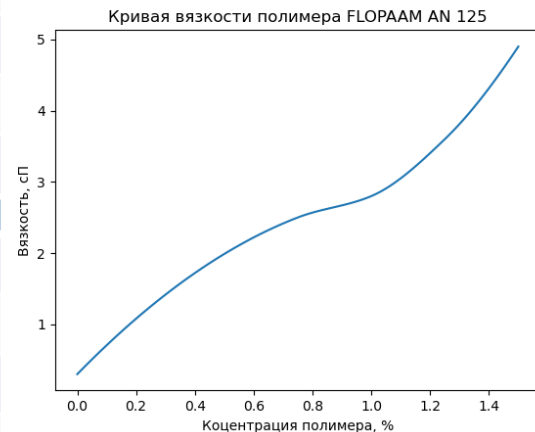
# Дизайн для полимера FLOPAAM AN 125



Число оторочек	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	c <sub>5</sub>
n = 1	0,0015	-	-	-	-
n = 2	0,0015	0,00046	-	-	-
n = 3	0,0015	0,0011	0,00034	-	-
n = 4	0,0015	0,0012	0,00054	0,00021	-
n = 5	0,0015	0,0012	0,00068	0,00036	0,00015

## Время заправки полимерных оторочек, П.О.

Число оторочек	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>
n = 1	0,5	-	-	-	-
n = 2	0,371	0,224	-	-	-
n = 3	0,2595	0,1745	0,1758	-	-
n = 4	0,241	0,1585	0,1193	0,110	-
n = 5	0,232	0,1495	0,0875	0,09	0,0793



Число оторочек	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
Экономия	-	12,1%	14,6%	15,6%	15,9%

# Результаты для малых $n$



$V_n$  - масса полимера для  $n$  оторочек

$\eta = \frac{V_1 - V_n}{V_1}$  - относительный выигрыш

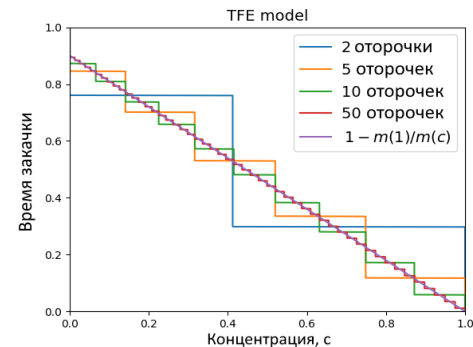
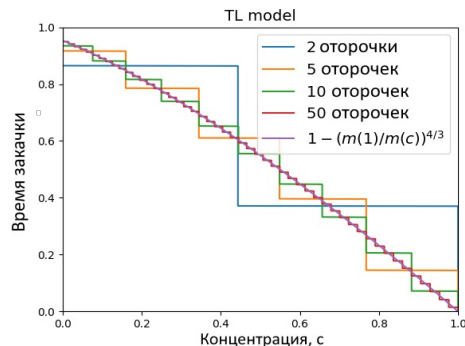
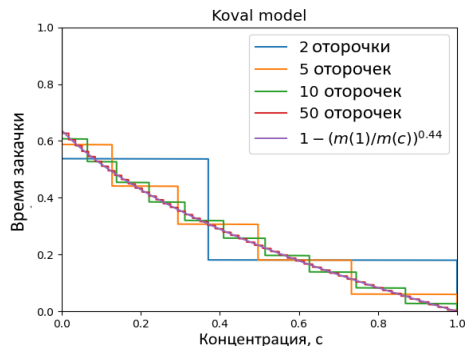
в массе полимера

вязкость полимера:

$\mu(c) = 0.3(1 + \alpha c)^2$ ,  $M = 10$

	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 10$	Limit
Koval	23,4%	28,1%	29,9%	30,9%	32,4%	33,5 %
Todd-Longstaff	17,0 %	20,1 %	21,2 %	21,7 %	22,4 %	22,6 %
TFE	17,1%	20,3%	21,4%	21,9%	22,6%	22,8 %

- Вывод: достаточно использовать 2-3 оторочки



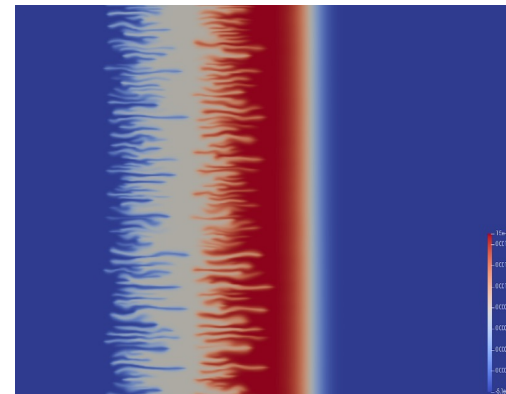
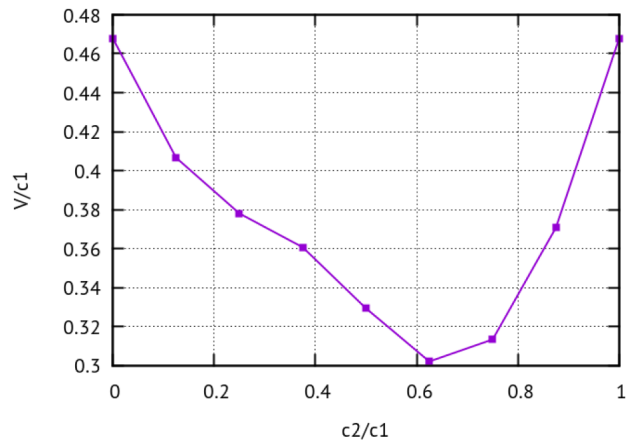
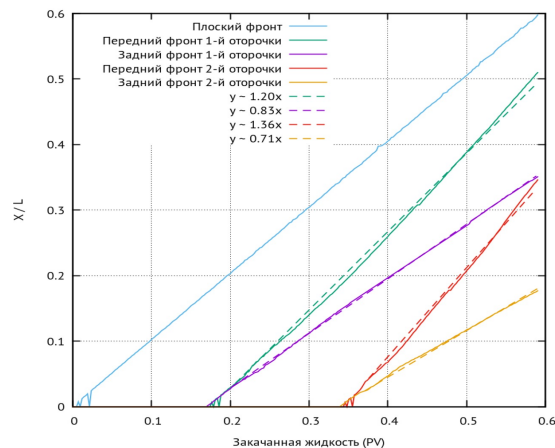


# Численная проверка

- Моделирование на базе DuMuX, 2 оторочки
- Неустойчивость инициализируется малой неоднородностью среды
- Скорости роста зоны смешивания взяты из численного моделирования

## Теоретические предположения, которые должны быть проверены:

- скорости роста зоны смешения остаются постоянными в случае нескольких оторочек;
- Скорости зон смешивания не зависят от наличия дополнительных оторочек, размеров оторочек, и размеров области закачки;



# Учет адсорбции возможен в модели TFE

В модели TFE можно учесть обратимую и необратимую адсорбцию

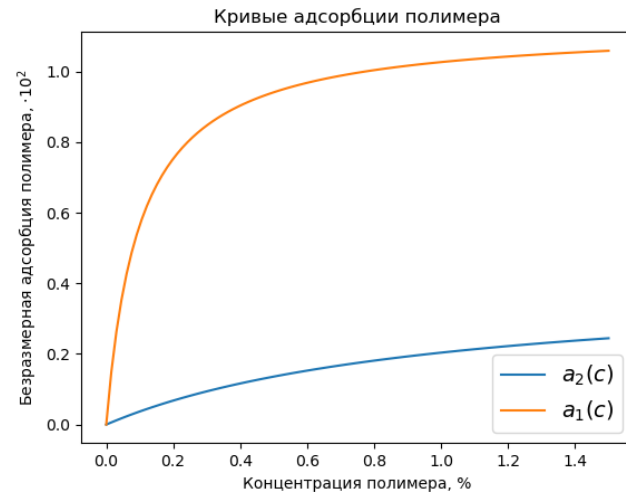
$$v^f \leq q_0 \cdot \frac{\int_{c_2}^{c_1} m(c) dc}{m(c_1)} \cdot \frac{1}{1 + a'(c_1)}$$
$$v^b \geq q_0 \cdot \frac{\int_{c_2}^{c_1} m(c) dc}{m(c_2)} \cdot \frac{1}{1 + a'(c_2)}$$

$a(c)$  – функция адсорбции:  $a(c) = \frac{(1-\varphi)}{\varphi} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \Gamma(c)$

$\varphi$  – пористость,

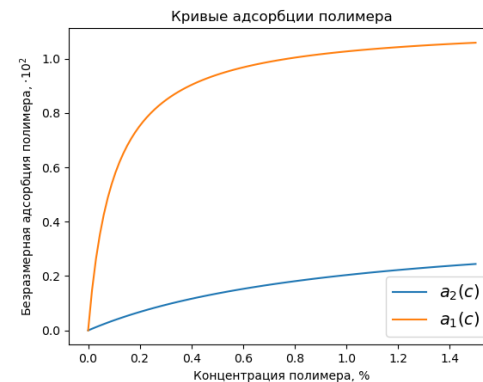
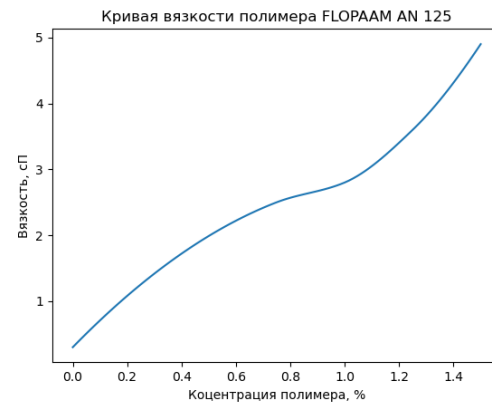
$\rho_w$  – плотность воды,  $\rho_s$  – плотность породы,

$\Gamma(c)$  – изотерма адсорбции (например, Ленгмюра)



# Дизайн для полимера FLOPAAM AN 125 с учетом адсорбции

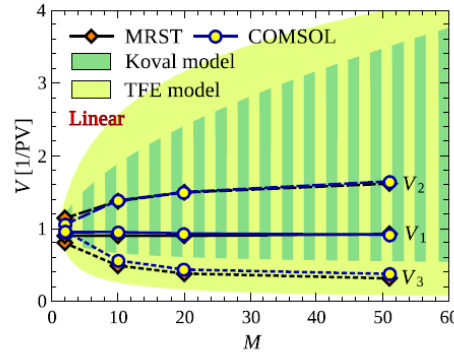
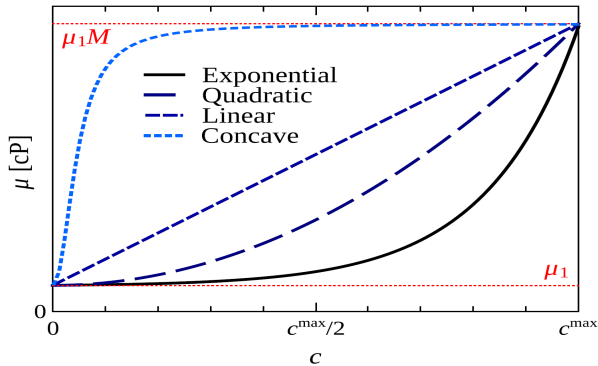
Число оторочек	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
$n = 1$	0,0015	-	-	-	-
$n = 2$	0,0015	0,00046	-	-	-
$n = 3$	0,0015	0,0011	0,00034	-	-
$n = 4$	0,0015	0,0012	0,00054	0,00021	-
$n = 5$	0,0015	0,0012	0,00068	0,00036	0,00015
<b>Время закачки полимерных оторочек</b>					
Число оторочек	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
$n = 1$	1	-	-	-	-
$n = 2$	0,794	0,357	-	-	-
$n = 3$	0,616	0,278	0,280	-	-
$n = 4$	0,5865	0,253	0,190	0,1756	-
$n = 5$	0,572	0,238	0,140	0,143	0,1265
Число оторочек	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
<b>Экономия</b>	-	9,7%	11,6%	12,4%	12,7%



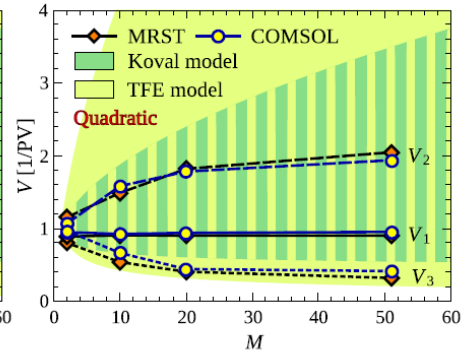
# Пессимистичность модели TFE



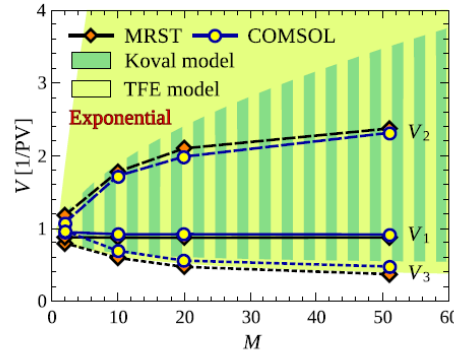
- Численное моделирование модели TFE: для различных кривых вязкости: всегда дает пессимистичную оценку
- Модель Ковалья не всегда дает пессимистичную оценку
- Примеры когда TFE модель точна: Экспоненциальная вязкость – на заднем фронте, вогнутая вязкость – на переднем фронте



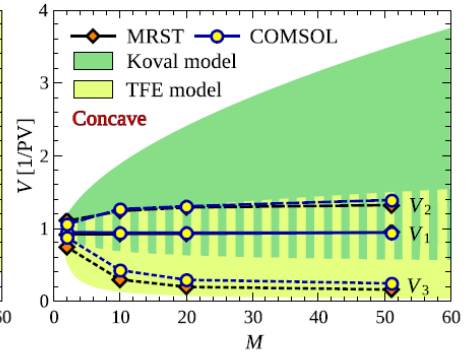
(a)



(b)



(c)

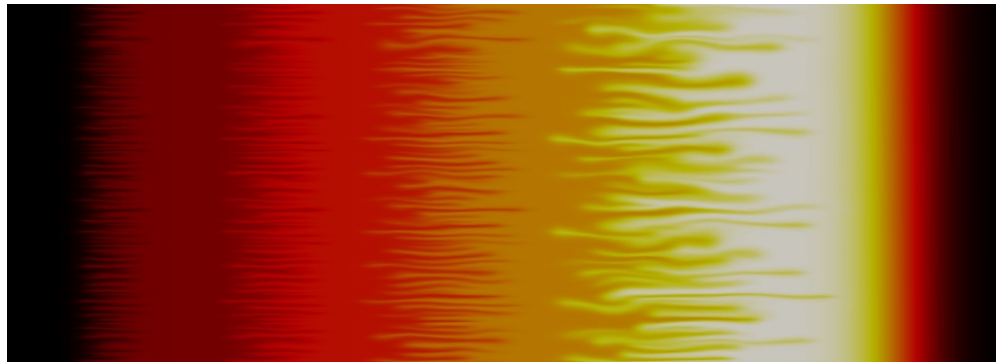


(d)

# Выводы и результаты



1. Постепенное понижение вязкости позволяет уменьшить количество полимера без потери эффективности
2. На практике достаточно использовать 2-3 оторочки
3. Выбор модели для «скорости пальцев» открытая проблема – нет строгих результатов – модель TFE перспективна
4. Преимущества предлагаемого метода
  - Предельный профиль определяется по формуле
  - Нет сложных вычислений — реализован автоматизированный расчет
  - Модель TFE позволяет учесть адсорбцию





---

# Спасибо за внимание!

Бахарев Федор Львович,  
Санкт-Петербургский  
Государственный Университет,  
[f.bakharev@spbu.ru](mailto:f.bakharev@spbu.ru)

---

# Предельный профиль закачки

Теорема [Бахарев, Енин, Калинин, Петрова, Растегаев, Тихомиров, 2021: arxiv:2012.03114]

При  $n \rightarrow \infty$  оптимальный профиль понижения вязкости:

$$T^\infty(c) = 1 - \left( \frac{\mu(c)}{\mu(c_1)} \right)^\beta$$

Koval:  $\beta = 2\alpha$

Todd-Longstaff:  $\beta = 2\omega$

TFE:  $\beta = 1$

