

# О ПРИМЕНИМОСТИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО КОНВЕКТИВНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ФИЛЬТРУЮЩЕГОСЯ ПОТОКА РАСТВОРИТЕЛЯ ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ФЛЮИДНОЙ ЭКСТРАКЦИИ



А.А. Саламатин, Р.Н. Максудов, К.Ю. Федорова  
arhouse131@rambler.ru

## Описание процесса

- Сверхкритическая флюидная экстракция (СФЭ) — проточный метод извлечения ценных природных соединений (масла) из растительного сырья.
- Для повышения интенсивности процесса сырье измельчается, и образовавшиеся частицы засыпаются в аппарат цилиндрической формы. В результате формируется полидисперсный зернистый слой [1].
- В качестве растворителя выступает  $\text{CO}_2$  в сверхкритическом состоянии, который пропитывает сырье, растворяет в себе запасенное масло, которое диффундирует по транспортным системам сырья к поверхности частиц и выносится фильтрующимся потоком к выходному сечению аппарата (Рис. 1).

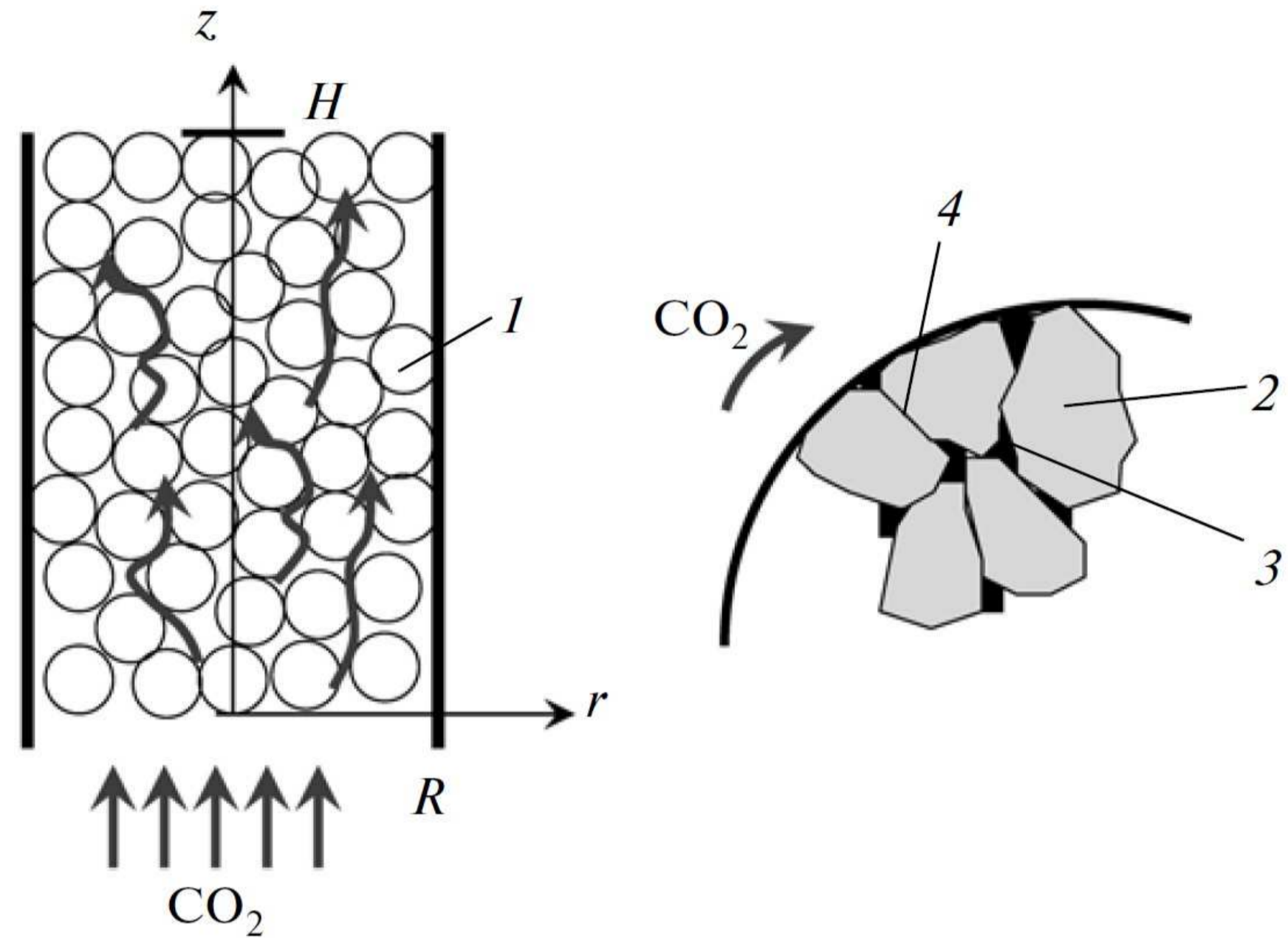


Рис. 1: Схема процесса: 1 — частица растительной засыпки, 2 — клетка, 3 — межклеточный канал, 4 — граница клетки.

## Основные результаты

- На основе модели сужающегося ядра на микроуровне отдельной частицы и конвективного нестационарного приближения массопереноса с учетом продольной дисперсии на макроуровне порового пространства аппарата проведен анализ характерных масштабов процесса.
- В результате определены границы применимости квазистационарного конвективного приближения фильтрующегося потока без учета продольной дисперсии.
- Показано, что для типичного разброса размеров частиц в аппарате  $a \in [10^{-4}; 10^{-3}]$  м, а также для скоростей фильтрации  $v \gtrsim 10^{-5}$  м/с эффектами, связанными с конвективной дисперсией можно пренебречь по сравнению с конвективным переносом ( $\delta_D = 0$ ).
- Квазистационарное приближение применимо не только в случае для так называемых масляных культур, но и в случае "длинных" аппаратов. Отношение того или иного сырья к масляным культурам существенно зависит от условий проведения эксперимента (от давления и температуры) и определяется условием  $x_{sc} \ll \theta_0$ , то есть параметр  $\delta_t \rightarrow 0$ .
- В случае типичных режимов экстракции при использовании квазистационарного конвективного приближения относительная ошибка в определении кривой выхода масла не превышает 5%.

## Литература

- [1] Egorov A.G., Salamatin A.A. *Bidisperse shrinking core model for supercritical fluid extraction* // Chem. Eng. Technol. – 2015. – V. 38. – № 7. – P. 1203–1211.
- [2] Funazukuri T., Kong C., Kagei S. *Effective axial dispersion coefficients in packed beds under supercritical conditions* // J. Supercritical Fluids – 1998. – V. 54. – P. 169–175.
- [3] Yu D., Jackson K., Harmon T.C. *Dispersion and diffusion in porous media under supercritical conditions* // Chem. Eng. Sc. – 1999. – V. 54. – P. 256–264.
- [4] Suzuki M., Smith J.M. *Axial dispersion in beds of small particles* // Chem. Eng. J. – 1972. – V. 3. – P. 357–367.
- [5] Salamatin A.A., Egorov A.G. *Optimization of supercritical fluid extraction: Polydisperse packed beds and variable flow rates* // J. Supercritical Fluids – 2015.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Татарстан в рамках научного проекта номер 15-41-02542 p\_поволжье\_a.

## Аннотация

В работе в рамках модели сужающегося ядра для случая бидисперсного зернистого слоя исследуются границы применимости квазистационарного конвективного приближения фильтрующегося потока без учета продольной конвективной дисперсии [1]. На основе известных корреляций [2–4] для коэффициента дисперсии  $D_{ax}$  показано, что при типичных расходах растворителя дисперсия в аппарате незначительна по сравнению с конвекцией, а квазистационарное приближение применимо для широкого класса растительного сырья, особенно при наличии так называемого свободного масла [1].

## Модель процесса

В безразмерных переменных  $x, \tau, \zeta$  уравнение массопереноса для фильтрующегося потока флюида примет следующий вид

$$\delta_t \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial x}{\partial \zeta} - \delta_D \frac{\partial^2 x}{\partial \zeta^2} = q_1(a_1, \tau, \zeta) + q_2(a_2, \tau, \zeta).$$

- $x$  — безразмерная концентрация целевых соединений в поровом пространстве аппарата;
- $\tau$  — безразмерное время;
- $\zeta$  — безразмерная координата, отсчитываемая вдоль оси аппарата;
- $q_i$  — безразмерный поток масла из  $i$ -ой фракции частиц полидисперсного зернистого слоя,  $i = 1, 2$ ;
- $a_1 \ll a_2$  — размерные радиусы частиц двух фракций бидисперсного приближения зернистого слоя;
- $\delta_t$  — безразмерный комплекс, характеризующий долю масла, растворенного в растворителе в порах зернистого слоя;
- $\delta_D$  — безразмерный комплекс, определяющий относительное влияние конвективного переноса по сравнению с дисперсионными эффектами.

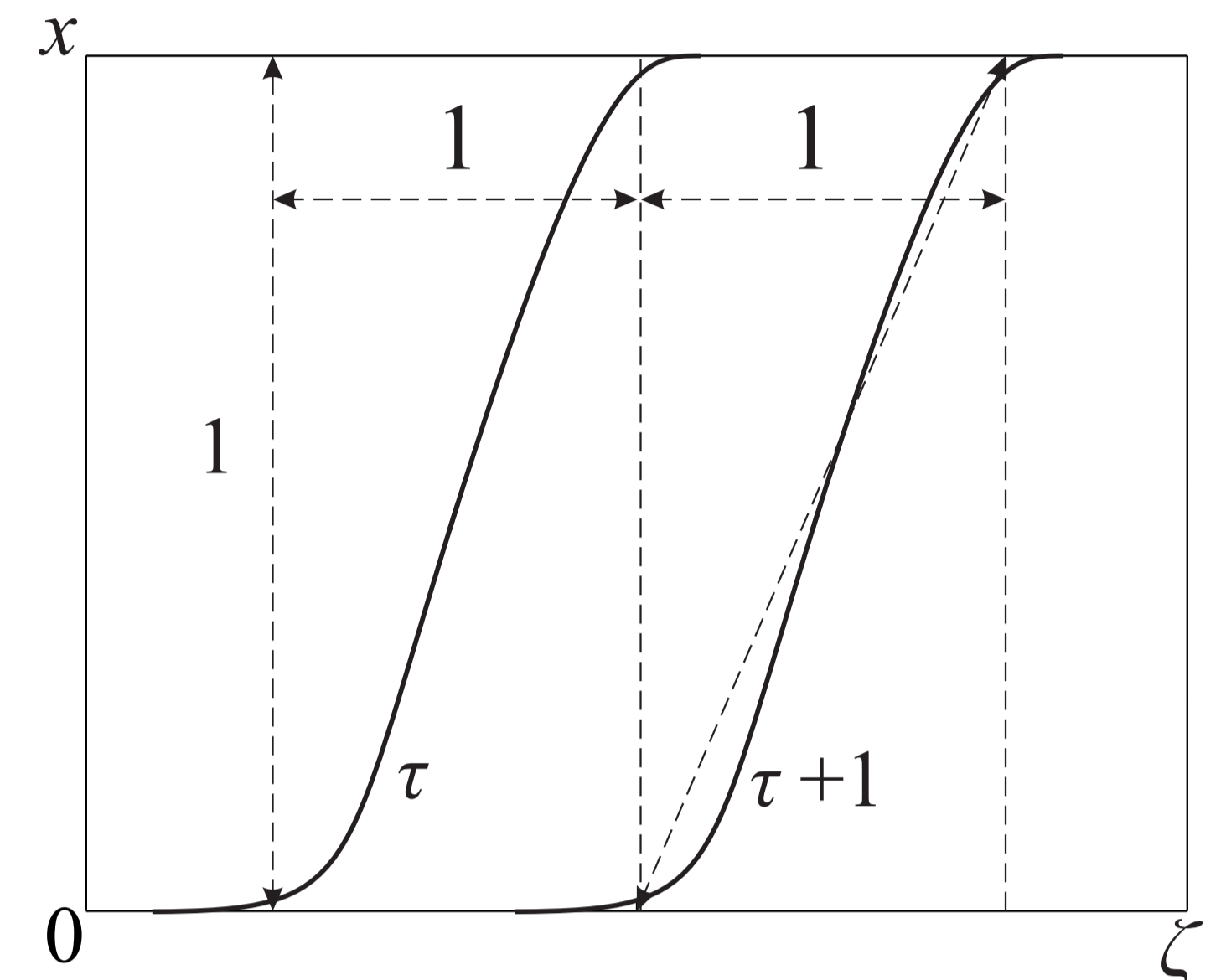


Рис. 2: Зависимость концентрации  $x$  в поровом пространстве аппарата от пространственной координаты  $\zeta$  для моментов времени  $\tau$  и  $\tau + 1$ .

## Характерные масштабы

Характерные масштабы процесса

$$x_{sc} = \theta_*, \quad \tau_{sc} = \frac{\theta_0 a_1^2}{\theta_* 6D}, \quad \zeta_{sc} = \frac{va_1^2}{6(1-e)D}$$

имеют следующий физический смысл

- Масштаб концентрации  $x_{sc}$  — концентрация насыщения растворителя целевыми соединениями;
- Масштаб времени  $\tau_{sc}$  — время прохождения фронта выработки через заданное сечение аппарата (Рис. 2);
- Пространственный масштаб  $\zeta_{sc}$  — ширина фронта выработки (Рис. 3).

$$\delta_t = \frac{ex_{sc}}{(1-e)\theta_0}, \quad \delta_D \equiv \frac{D_{ax}}{v\zeta_{sc}} = 6 \frac{DD_{ax}}{v^2 a_1^2} (1-e)$$

- $\theta_0$  — плотность начальных запасов масла в сырье;
- $D$  — коэффициент эффективной диффузии соединений внутри сырья;
- $D_{ax}$  — коэффициент продольной дисперсии целевых соединений в поровом пространстве аппарата;
- $v$  — скорость фильтрации растворителя;
- $e$  — пористость зернистого слоя.

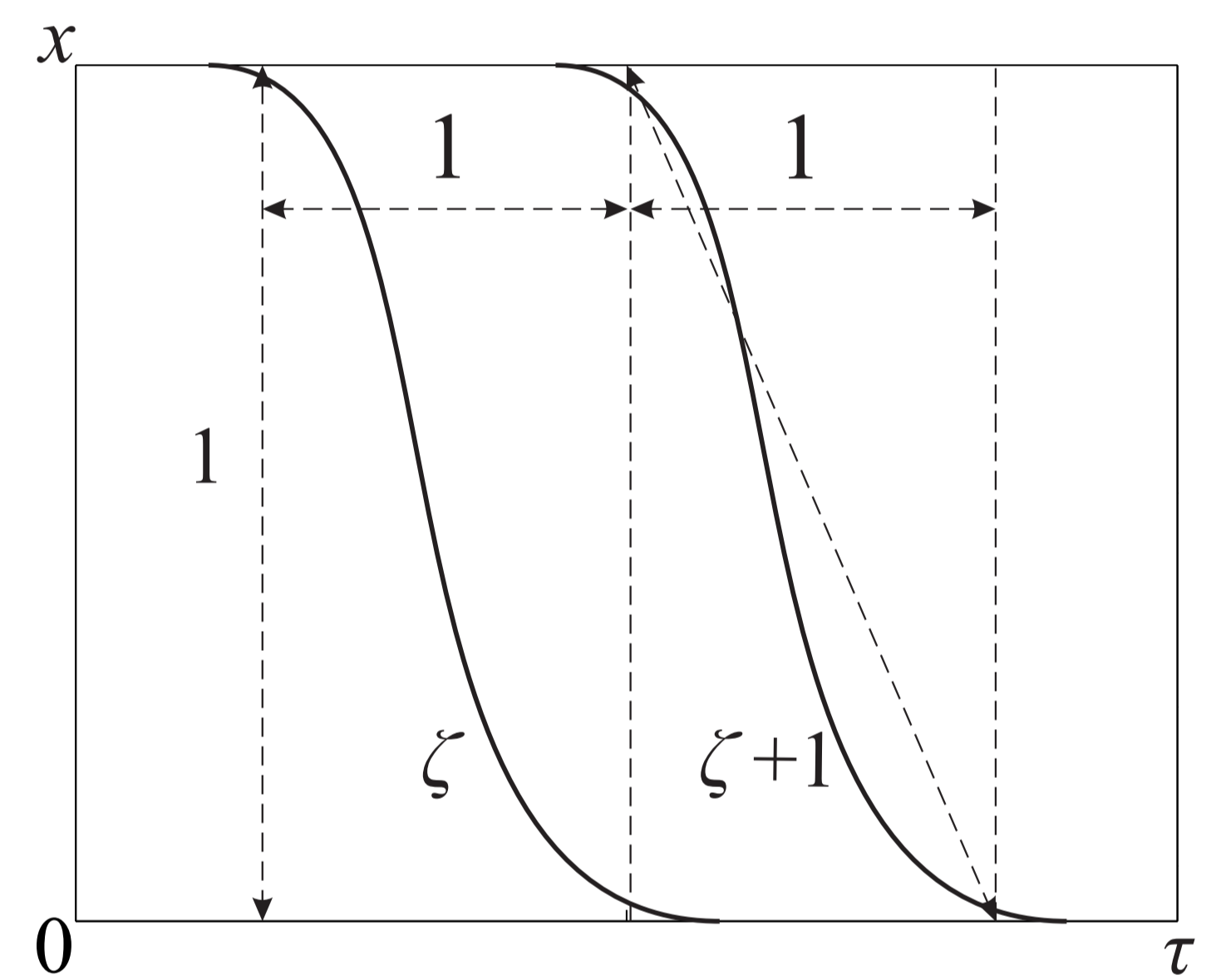


Рис. 3: Зависимость концентрации  $x$  в поровом пространстве аппарата от времени  $\tau$  для двух положений  $\zeta$  и  $\zeta + 1$  в аппарате.

## Учет конвективной дисперсии и кумулятивного слагаемого

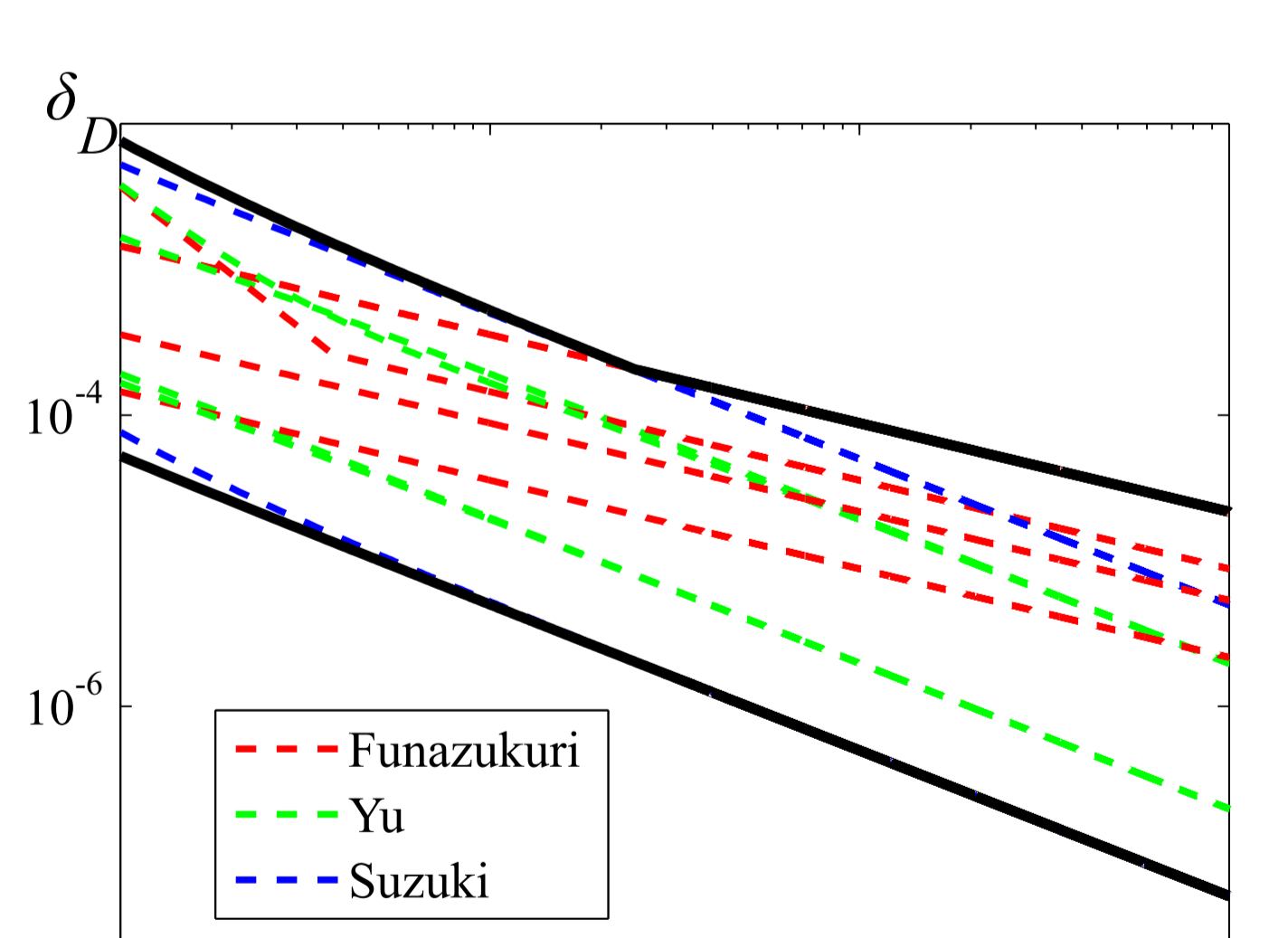


Рис. 4: Зависимость безразмерного комплекса  $\delta_D$  от скорости фильтрации  $v$  при характерных значениях бинарной диффузии  $D_{12}$  и размерах частиц  $a$ .

- Анализ (Рис. 4) доступных корреляций для коэффициента конвективной дисперсии  $D_{ax}$  в сверхкритических флюидах, а также типичных режимов работы экстракционных установок показал, что

$$\delta_D \leq 0.01.$$

- Вычислительные эксперименты при различных возникающих на практике соотношениях физических параметров показали, что при достаточно большой погрешности в определении концентрации при пренебрежении конвективной дисперсией погрешность в определении кривой выхода масла не превышает 5% (Рис. 5а-с).
- Вычислительные эксперименты для немасляных культур  $\delta_t = 0.1$  показали, что рассматриваемый процесс характеризуется еще одним масштабом времени

$$\tau_{sc}^1 = \frac{\theta_0 H}{\theta_* v},$$

означающим время прохождения фронта через аппарат.

- При типичных режимах экстракции,  $v \in [10^{-5}; 10^{-3}]$  м/с, практически любое сырье можно рассматривать в квазистационарном приближении при наличии свободного масла, то есть, когда доля пыли [1] значительна.

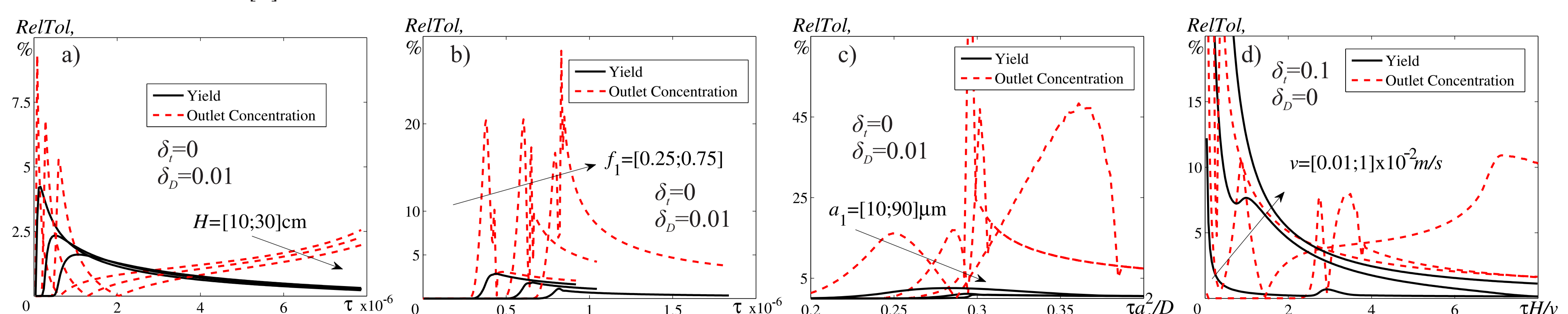


Рис. 5: Относительная погрешность кривой выхода масла (сплошные линии) и концентрации в порах зернистого слоя (пунктирные линии) при пренебрежении дисперсионным слагаемым (а-с) и кумулятивным (д).  $f_1$  — объемная доля пылевой фракции.