

**Асимптотические разложения внутренней подмодели процесса  
сверхкритической флюидной экстракции**

*Саламатин Артур Андреевич*

*Аспирант*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*E-mail: Arthouse131@rambler.ru*

Во время сверхкритической флюидной экстракции измельченные семена растений помещают в колонку экстрактора цилиндрической формы. Через сформированный пористый зернистый слой прокачивается растворитель в сверхкритическом состоянии. Он проникает внутрь частиц сырья и растворяет запасенное в растительных клетках масло, которое диффундирует по внутренним транспортным системам к поверхности частиц.

В работе получены асимптотические разложения уточненной модели процесса на уровне индивидуальной частицы сырья. Она учитывает его клеточное строение и наличие двух транспортных систем — апопласт ( $a$ ), и симпласт ( $s$ ), а также массообмен между ними через разделяющую их клеточную мембрану. Масло содержится в клетках в виде капель. Изначальное количество масла значительно превышает растворяющую способность экстрагента (масличное сырье,  $\Theta \ll 1$ ). В результате диффузии целевых соединений сквозь мембрану в каналы апопласта капли масла постепенно истощаются, пока в клетке не останется только раствор при некоей неизвестной концентрации.

Обозначим через  $\theta$  — концентрацию растворенных в соответствующей транспортной системе веществ, нормированную на единицу,  $\tau$  — безразмерное время,  $d$  — безразмерный коэффициент диффузии,  $x_s$  — текущие запасы масла в клетке (в симпласте). В этих обозначениях модель, состоящая из двух дифференциальных уравнений баланса массы и одного нелинейного алгебраического уравнения, запишется следующим образом

$$0 = M(\theta_s - \theta_a) + d_a \Delta \theta_a, \quad \frac{M}{1+M} \frac{\partial x_s}{\partial \tau} = d_s \Delta \theta_s + d_a \Delta \theta_a, \quad (1)$$

$$\theta_s = \min\{1, x_s/\Theta\}.$$

Последнее соотношение означает, что нерастворенные капли мгновенно восполняют концентрацию раствора в клетке до насыщения. При  $x_s < \Theta$  капли в клетках истощены. Характерный масштаб времени равен сумме двух времен: диффузии через мембрану и переносу по каналам апопласта. Принято, что эти два элемента структуры частицы составляет основное сопротивление массопереносу.

Модель содержит три критерия подобия:  $M$ ,  $d_s M^{-1}$  и  $\Theta$ . Первые два характеризуют время переноса по двум транспортным системам и через клеточную мембрану по отношению друг к другу. Третий параметр характеризует масличность сырья.

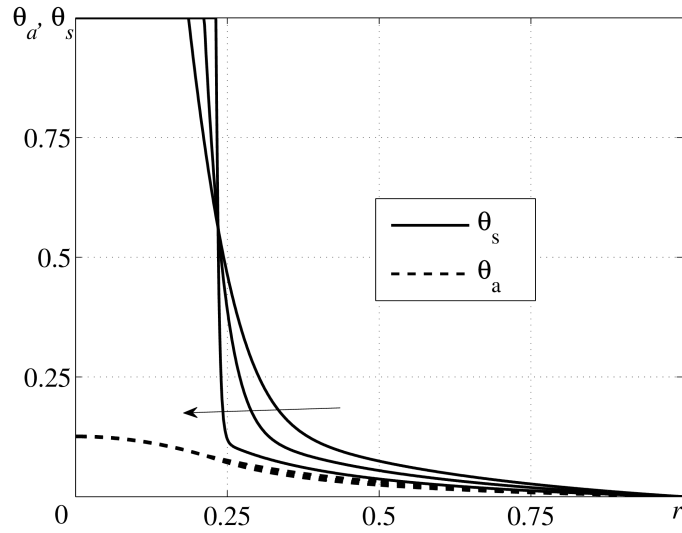
При асимптотическом разложении уравнений (1) по малому параметру  $\Theta$  при  $d_s = 0$  (одна транспортная система,  $d_a = 1$ ) построены главные члены разложения в случае  $M \gg 1$ , что соответствует известной модели SC, и в случае  $M \ll 1$ , что соответствует пределу VC. Показано также, что в частице могут развиваться два пограничных слоя (рисунки 1 и 2), определены их характерные пространственные масштабы.

Анализ уравнений модели в случае двух транспортных систем,  $d_s = 1 - d_a > 0$ , показал, что в задаче вырождается массовый поток, и существует скачок текущих запасов масла в частице. Определена величина этого скачка, а также построен главный член разложения при  $M \ll 1$ . Проведен качественный анализ решения при различных значениях критерия  $d_s M^{-1}$ . Указаны условия возникновения предельного режима, для развития которого необходимо наличие двух транспортных систем.

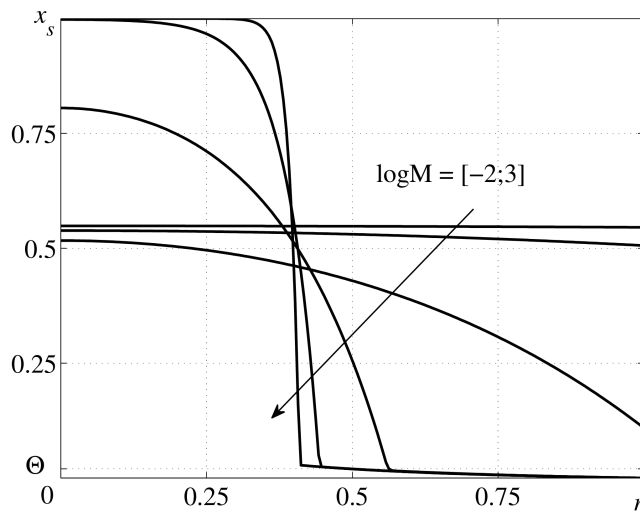
Слова благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Республики Татарстан в рамках проектов 15-41-02542 р\_поволжье\_а и 16-31-00007 мол\_а.

Иллюстрации



**Рис. 1.** Концентрации  $\theta_a$  и  $\theta_s$  при  $\Theta = \{0.001, 0.01, 0.02\}$  и  $M = 1$ . Стрелка указывает направление убывания  $\Theta$



**Рис. 2.** Запасы масла  $x_s$  в клетках частицы при различных  $M$  и одинаковом безразмерном времени,  $\Theta = 0.02$ . Стрелка указывает направление роста  $\log M$  с постоянным шагом, равным единице