

УДК 66.061.4

**КИНЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ  
ДЛЯ НЕПОРИСТЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Ю.А. Тепляков<sup>1</sup>, С.П. Рудобашта<sup>2</sup>, В.М. Нечаев<sup>3</sup>, А.М. Климов<sup>4</sup>**

*Кафедра «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ГОУ ВПО «ТГТУ» (1);  
кафедра «Теплотехника и использование тепла в сельском хозяйстве»,  
ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный  
университет им. В.П. Горячкина» (2);  
кафедры: «Химическая инженерия» (3),  
«Технологическое оборудование и пищевые  
технологии» (4), ГОУ ВПО «ТГТУ»;  
mmf@nnn.tstu.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** время экстрагирования; кинетические коэффициенты; расчет кинетики экстрагирования.

**Аннотация:** Изложены методика и алгоритм расчета кинетики непрерывного противоточного процесса экстрагирования в системе «твердое тело – жидкость».

---

В настоящее время широкое распространение получили противоточные экстракторы большой единичной мощности. Технологический расчет таких аппаратов при проектировании базируется на практическом опыте эксплуатации действующего оборудования, что может приводить к значительным неточностям определения длительности процесса и производительности.

В работе анализируются известные методы расчета процесса экстрагирования в системе «твердое тело – жидкость», и приводится зональный метод расчета времени пребывания материала в аппарате [1].

Существующие методы расчета кинетики экстрагирования основаны на упрощениях физической сущности процесса, в частности:

- при решении линейного уравнения нестационарной диффузии совместно с уравнением материального баланса получено уравнение кинетики при допущении постоянства кинетических коэффициентов на протяжении всего процесса экстрагирования [2];

- принято, что физические и гидродинамические характеристики постоянны по всей длине аппарата, и делается допущение, что концентрация в экстрагенте изменяется по экспоненциальному закону [3];

- интервально-итерационный метод расчета массообмена предполагает использование линейного закона изменения концентрации внешней фазы и постоянство кинетических коэффициентов для каждого интервала. Разбиение процесса экстрагирования на интервалы по времени, а не по концентрации не дает возмож-

ности сразу правильно задать значения параметров и поэтому требует применения итерационной процедуры счета [4].

Упомянутые методы расчета кинетики экстрагирования применимы для капиллярно-пористых тел, однако, для непористых материалов указанные методы (кроме интервально-итерационного метода) приводят к значительным погрешностям.

Достаточно точное решение расчета кинетики экстрагирования можно получить интегрированием нелинейного уравнения массопроводности [5], но, при этом необходимо знание аналитической зависимости эффективного коэффициента диффузии от концентрации.

В данной работе рассмотрено применение зонального метода для расчета кинетики непрерывного процесса экстрагирования низкомолекулярных соединений (НМС) из поликапроамида [6], массоперенос веществ в которых подчиняется «фииковской» диффузии, а экстрагент не является активным растворителем по отношению к материалу. Анализ кинетических кривых экстрагирования, представ-

ленных в координатах  $\left( \frac{c_n - c}{c_n}, \sqrt{\tau} \right)$ , согласно Крэнку, показал, что процесс описывается уравнением диффузии Фика.

Характерной особенностью непрерывного противоточного процесса является определение концентрации распределяемого вещества в материале  $\bar{c}$  и экстрагенте  $c_c$  при установившемся режиме положением поперечного слоя в аппарате:  $\bar{c} = f(H_a)$ ,  $c_c = f(H_a)$ . В реальных условиях массообмена концентрация внешней фазы изменяется по высоте аппарата  $H_a$ , однако, применение уравнения нестационарной диффузии при технологическом расчете всего непрерывного массообменного процесса по зональному методу основано на допущении постоянной концентрации внешней фазы в пределах каждой зоны (интервала), следовательно принимается полное перемешивание фазы в каждой зоне.

В процессе экстрагирования из твердых тел диффузионное сопротивление в твердой фазе – преобладающее, оценка лимитирующей стадии массопереноса проводится по величине массообменного критерия Био  $Bi_m$ . Значения  $Bi_m$  для размеров крошки поликапроамида и скорости внешней фазы, имеющих место в промышленных условиях, находятся в пределах  $10^3 \dots 10^5$ , что подтверждает полное контролирование кинетики процесса внутридиффузионным сопротивлением.

Температура материала является одним из главных факторов, влияющих на внутридиффузионный массоперенос. Время нагрева частиц до температуры экстрагента, при допущении отсутствия влияния фазовых превращений на нагрев, определяется по уравнению «чистого теплообмена». Проведенный расчет процесса нагревания твердых частиц, находящихся в контакте с жидкостью, имеющей постоянную температуру, показывает, что время прогрева материала до температуры среды, по сравнению с общей продолжительностью процесса экстрагирования, в большинстве случаев незначительно, то есть температура материала может быть принята практически равной температуре экстрагента.

Определение времени пребывания материала в экстракторе – основная цель расчета кинетики процесса экстрагирования. Это позволяет установить и сравнить производительность аппарата при различных способах и режимах ведения процесса и определить размеры аппарата.

На основе зонной модели, обобщенной зависимости для определения коэффициента диффузии  $D_e$  и данных по диффузионному равновесию, с учетом их изменения по высоте аппарата от температуры и концентрации, разработана методика расчета кинетики экстрагирования НМС из поликапроамида и других непористых полимерных материалов.

При зональном методе расчета времени пребывания гранулированного материала в аппарате, его высота делится на произвольное количество зон (интервалов) в пределах всего диапазона изменений концентраций извлекаемого компонента.

Время экстрагирования рассчитывают, принимая в первой зоне равномерное начальное распределение концентраций в твердом теле для регулярного режима, по формуле

$$\tau_1 = \frac{R^2}{\mu_1^2 D_{e1}} \ln \frac{B_1}{E_1}. \quad (1)$$

Время пребывания частиц во второй и последующих зонах рассчитывают в предположении, что начальное распределение уже не является равномерным, а равно конечному распределению предыдущей зоны, и распределение концентраций в конце каждой зоны соответствует регулярному режиму

$$\tau_i = \frac{1}{D_{ei} \sum_{j=1}^s \mu_{j,i}^2 / R_j^2} \ln \frac{\prod_{j=1}^s B_{j,i}^*}{E_i}, \quad i \geq 1. \quad (2)$$

Коэффициент  $B_{j,i}^*$  учитывает неравномерное распределение начальной концентрации в  $i$ -й зоне для  $j$ -й координаты. При больших значениях критерия  $Bi_m$  задача является чисто внутренней, поэтому можно принять, что корни характеристического уравнения в предыдущей и рассматриваемой зонах равны ( $\mu_{i-1} = \mu_i$ ), в результате чего при  $i > 1$  коэффициент  $B_{j,i}^* = 1$ .

Общее время пребывания твердой фазы в аппарате, позволяющее рассчитать высоту экстрактора, составляет

$$\tau \geq \sum_{i=1}^m \tau_i. \quad (3)$$

Алгоритм расчета противоточного экстрактора для непористых полимерных материалов в виде блок-схемы приведен на рис. 1 [7].

Определение эффективного коэффициента диффузии осуществлялось нестационарными методами: зональным и графическим (с помощью расчетных диаграмм). Для непористых полимерных материалов коэффициент эффективной диффузии (массопроводности)  $D_e$  при миграции водных растворов НМС зависит от объемной доли аморфной фазы полимера  $\epsilon_{ам}$ , температуры материала  $T$ , концентрации распределяемого вещества  $c$  и диаметра диффундирующих молекул [8]:

$$D_e = \frac{d_{H_2O}^2}{d_{диф.в-ва}^2} D_{\infty} \exp \left[ -\frac{E_D}{R^* T} \right], \quad (4)$$

где

$$D_{\infty} = \exp \left( -11\epsilon_{ам} - 0,92 \frac{c}{c_{макс\Gamma}} \right); \quad (5)$$

$$E_D = 78 \cdot 10^{-3} (1 - 0,475 \epsilon_{ам}) \left( 1 - 0,16 \frac{c}{c_{макс\Gamma}} \right), \quad (6)$$

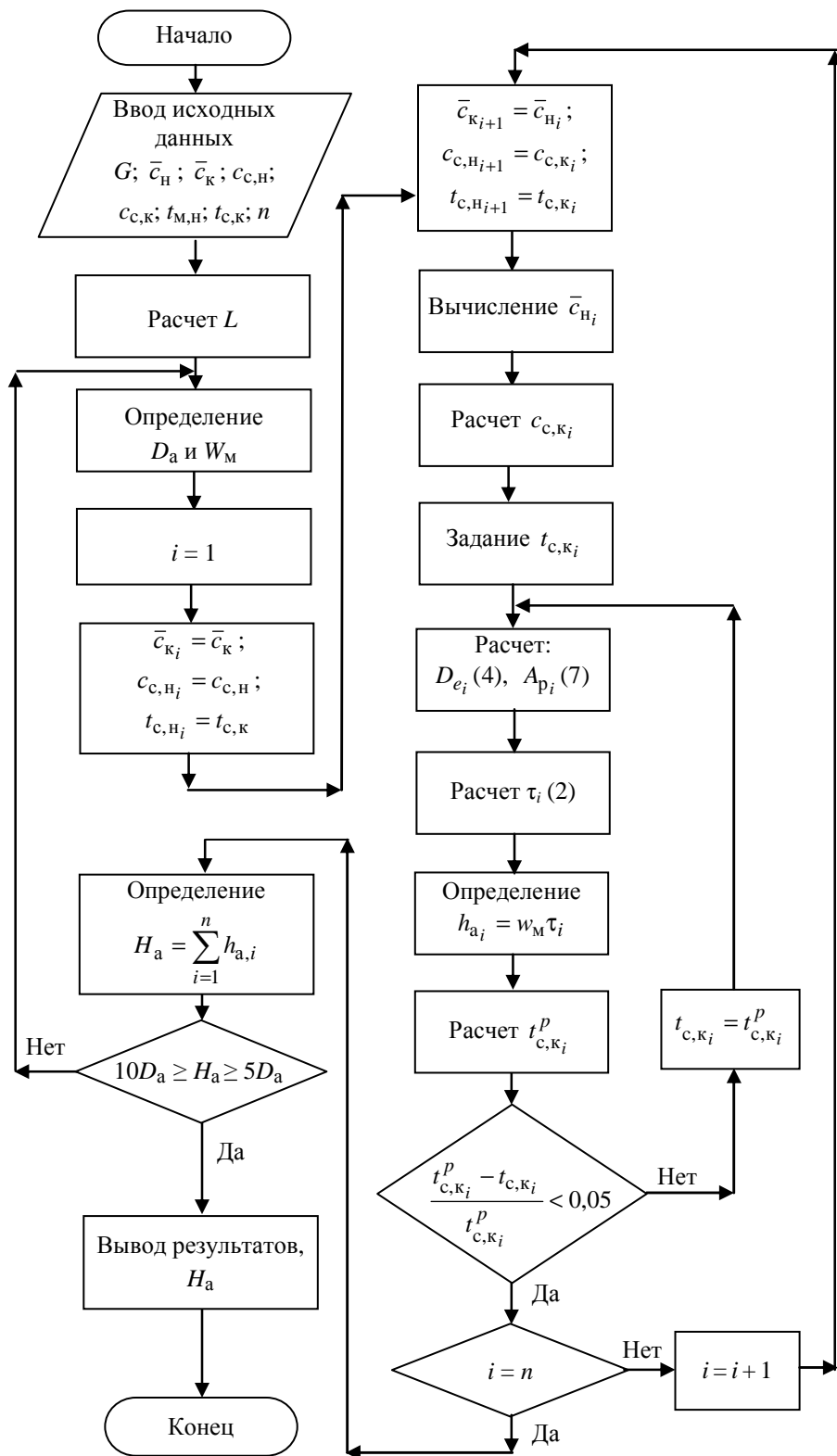


Рис. 1. Блок-схема расчета противоточного экстрактора

$E_D$  – энергия активации процесса диффузии, кДж/кмоль;  $R^* = 8,31$  кДж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная;  $c_{\max\Gamma}$  – максимальная гигроскопическая емкость.

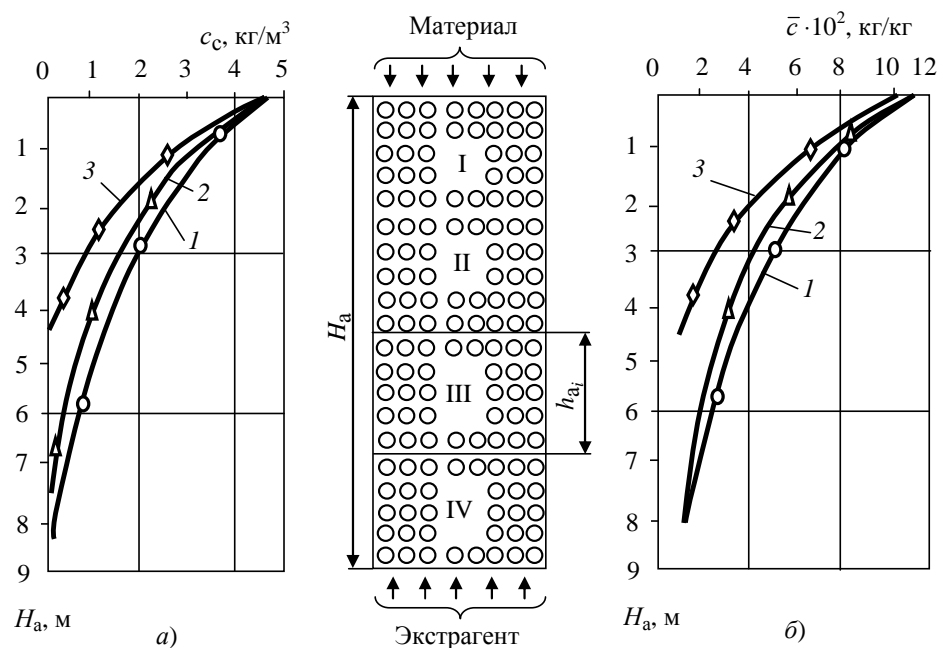
Значения эффективного коэффициента диффузии  $D_e$ , по сравнению с капиллярно-пористыми материалами, примерно на порядок ниже последних. Это объясняется тем, что молекулы целевого компонента диффундируют не в жестких порах, а между звеньями макромолекул полимера.

Для расчета коэффициента распределения  $A_p$  использована его температурная зависимость, найденная по экспериментальным данным для системы «поликапроамид – вода» [9],

$$A_p = 0,78 \cdot 10^{-2} (1 - 0,00314t). \quad (7)$$

Изложенная методика расчета кинетики экстрагирования апробирована на промышленном экстракторе, применяемом в производстве поликапроамида, и сопоставлена с методом расчета на основе аналитического решения линейной задачи для частиц шарообразной формы в противоточном аппарате при усредненных по высоте температуре, коэффициенте диффузии и коэффициенте распределения [10]. Экспериментальная проверка (рис. 2) показала, что при расчете по известному аналитическому решению погрешность составляет 57 % , а по рекомендуемому методу – не превышает 8 %.

Предложенная методика расчета кинетики экстрагирования для системы «твердое тело – жидкость» может быть рекомендована для определения оптимальных размеров аппарата на стадии проектирования, а также для анализа работы действующих аппаратов с целью повышения эффективности их использования.



**Рис. 2. Изменение концентрации в слое, работающем по принципу противотока:**

*a* – экстрагент; *б* – материал;

1 – эксперимент; 2 – расчет по предлагаемой методике;

3 – расчет по аналитическому решению [10]

Данная методика имеет следующие отличия по сравнению с существующими методами расчета кинетики экстрагирования в системе «твердое тело – жидкость»:

- предусматривает влияние изменяющегося коэффициента эффективной диффузии от концентрации и температуры;
- учитывает по высоте аппарата влияние температуры на коэффициент распределения  $A_p$ , используемый при определении равновесной концентрации;
- обладает универсальностью и простотой расчетных формул;
- повышает точность расчета.

#### *Список литературы*

1. Рудобашта, С.П. Диффузия в химико-технологических процессах / С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов. – М. : Химия, 1993. – 238 с.
2. Аксельруд, Г.А. Массообмен в системе «твердое тело – жидкость» / Г.А. Аксельруд. – Львов : Изд-во Львовского ун-та, 1970. – 186 с.
3. Кишиневский, М.Х. К расчету процесса экстракции в системах «твердое тело – жидкость» / М.Х. Кишиневский, Т.С. Корниненко // Журн. приклад. химии. – 1976. – Т. 49, вып. 10. – С. 2258–2261.
4. Лысянский, В.М. Процесс экстракции сахара из свеклы. Теория и расчет / В.М. Лысянский. – М. : Пищевая пром-ть, 1973. – 224 с.
5. Рудобашта, С.П. Кинетика нестационарной массопроводности при мелко-линейной зависимости коэффициента массопроводности от концентрации / С.П. Рудобашта, Э.Н. Очнев, А.Н. Плановский // Теорет. основы хим. технологии. – 1977. – Т. 11, № 3. – С. 333–342.
6. Вольф, Л.А. Производство поликапромида / Л.А. Вольф, Б.Ш. Хайтин. – М. : Химия, 1977. – 207 с.
7. Тепляков Ю.А. Исследование внутреннего массопереноса при экстрагировании из твердых тел и расчет кинетики процесса : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08. / Ю.А. Тепляков. – М., 1981. – 16 с.
8. Обобщенные зависимости для определения коэффициентов диффузии в твердых материалах / Ю.А. Тепляков [и др.] // Вестн. Тамб. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. – 1999. – Т. 4, вып. 3. – С. 385–387.
9. Тепляков, Ю.А. О равновесии при экстракции НМС из поликапроамида / Ю.А. Тепляков // Науч. тр. / Моск. ин-т хим. машиностроения. – М., 1975. – Вып. 68. – С. 79–80.
10. Китаев, Б.И. Теплообмен в шахтных печах / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, В.Д. Сучков. – Свердловск : Metallurgizdat, 1957. – 279 с.

---

### **Kinetic Calculation of Extraction Process for Porosity-Free Granular Materials**

**Yu.A. Teplyakov<sup>1</sup>, S.P. Rudobashta<sup>2</sup>, V.M. Nechaev<sup>3</sup>, A.M. Klimov<sup>4</sup>**

*Department “Applied Geometry and Computer Drawing”, TSTU (1);  
Department «Heat Engineering and Application in Agriculture»,  
Moscow State Agro-Engineering University named after V.P. Gorachkin (2);  
Departments “Chemical Engineering” (3),  
“Manufacturing Equipment and Food Production Technologies” (4), TSTU*

**Key words and phrases:** calculation of extraction kinetics; duration of extraction; kinetic coefficients.

**Abstract:** The paper presents methods and algorithms of calculation of continuous countercurrent extraction process in the «solid – liquid» system.

---

### **Kinetische Berechnung des Prozesses des Extrahierens für die nichtporösen granulierten Stoffe**

**Zusammenfassung:** Es sind die Methodik und den Algorithmus der Berechnung der Kinetik des ununterbrochenen Gegenstromprozesses des Extrahierens im System “fester Körper – Flüssigkeit” dargelegt.

---

### **Calcul cinétique du processus de l'extraction pour les matériaux granulés non poreux**

**Résumé:** Sont exposés la méthode et l'algorithme du calcul de la cinétique du processus continu de l'extraction dans le système «corps solide – liquide».

---

**Авторы:** *Тепляков Юрий Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика» ГОУ ВПО «ТГТУ»; *Рудобахта Станислав Павлович* – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, заведующий кафедрой «Теплотехника и использование тепла в сельском хозяйстве» ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина»; *Нечаев Василий Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая инженерия»; *Климов Анатолий Михайлович* – кандидат технических наук, профессор, декан факультета «Химическая и биологическая безопасность», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химическая инженерия» ГОУ ВПО «ТГТУ».

---