

В. С. Овсепян, А. М. Цирлин

## Выбор термодинамически-оптимальной последовательности разделения многокомпонентных смесей в системах, использующих механическую энергию

Аннотация. Рассмотрена задача о порядке разделения многокомпонентной смеси в системах, использующих механическую или электрическую энергию, минимизирующем затраты энергии в процессах заданной производительности, и об оптимальном распределении поверхностей контакта между ступенями разделения.

*Ключевые слова и фразы:* разделение смесей, многокомпонентные смеси, необратимые затраты мощности, оптимальный порядок разделения.

### Введение и постановка задачи

Оптимизационная термодинамика рассматривает предельные возможности термодинамических систем при заданной интенсивности потоков и ограничениях на поверхности контакта взаимодействующих сред, косвенно соответствующих ограничениям на интегральные коэффициенты переноса при тепло- и массообмене [1, 2]. Подавляющее большинство работ в этом направлении посвящено предельным возможностям тепловых и холодильных машин [3, 4]. Между тем самую значительную часть термодинамических систем, использующихся в промышленности, представляют процессы разделения.

Эти процессы сопровождаются большими затратами энергии, нижнюю оценку которых дает работа разделения в обратимом процессе [5, 6]  $A^0$ , равная приросту свободной энергии смеси. Обратимая работа зависит от количества разделяемой смеси, ее состава и составов конечных продуктов. Для смесей, близких к идеальным газам или идеальным растворам, свободная энергия (энергия Гиббса) одного моля  $i$ -го компонента в  $j$ -ом потоке равна его химическому потенциалу

$$(1) \quad \mu_{ij}(T, P_j, x_{ij}) = \mu_i^0(T, P_j) + RT \ln x_{ij}.$$

© В. С. Овсепян<sup>(1)</sup>, А. М. Цирлин<sup>(2)</sup>, 2017

© Ванадзорский Государственный университет им. Ов. Туманяна<sup>(1)</sup>, 2017

© Институт программных систем имени А. К. Айламазяна РАН<sup>(2)</sup>, 2017

© Программные системы: теория и приложения, 2017

Здесь  $R, T$  — универсальная газовая постоянная и абсолютная температура смеси;  $x_{ij}$  — концентрация  $i$ -го компонента в  $j$ -ом потоке в мольных долях;  $\mu_i^0(T, P_j)$  — химический потенциал  $i$ -ой компоненты в чистом виде, известный для большинства веществ;  $P_j$  — давление в  $j$ -ом потоке.

Обратимая работа разделения одного моля смеси, состоящей из  $n$  веществ с концентрациями  $x_{i0}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) равна [6] разности химических потенциалов продуктов разделения и исходной смеси.

В дальнейшем мы будем рассматривать непрерывные процессы разделения, производительность которых определена потоком разделяемой смеси  $g_0$ , а температура и давление разделяемой смеси совпадают с температурой и давлением продуктов разделения. Обратимым процессам в стационарной системе с ненулевыми потоками тепло и массообмена соответствуют сколь угодно большие коэффициенты тепло и массопереноса. Реальные процессы всегда необратимы, но для оценки их эффективности могут быть использованы границы, достижимые в обратимых процессах.

Мощность разделения в обратимом процессе при неполном разделении

$$(2) \quad p^0 = Rg_0T \left[ \sum_{j=1}^m \gamma_j \sum_{i=1}^n x_{ji} \ln x_{ji} - \sum_{i=1}^n x_{i0} \ln x_{i0} \right] = g_0 B_1$$

и

$$(3) \quad p^0 = -Rg_0T \sum_{i=1}^n x_{i0} \ln x_{i0} = g_0 B$$

при разделении на чистые компоненты.

Обратимая мощность разделения дает оценку снизу мощности разделения, не зависящую от кинетики тепломассообмена и от организации процесса. Она зависит только от производительности (линейно) и составов потоков на входе и на выходе системы. Недостатки обратимых оценок являются следствием их универсальности: они занижены и не позволяют судить о совершенстве организации процесса, в том числе решать такие задачи как выбор порядка разделения, распределение коэффициентов переноса между стадиями процесса, влияние ограниченных коэффициентов переноса, предельно-возможная производительность.

Термин «обратимая мощность» на первый взгляд кажется нелепым. Ведь обратимым процессам соответствуют сколь угодно малые интенсивности потоков, в том числе потока энергии. Тем не менее он имеет смысл и для ненулевой мощности, если коэффициенты тепло- и массообмена сколь угодно велики.

Чтобы ставить и решать упомянутые выше задачи, нужно учесть влияние необратимости, приводящей к дополнительным затратам мощности  $\Delta p > 0$ . При заданной производительности и составах потоков именно минимуму  $\Delta p$  соответствует оптимальная организация процесса. В свою очередь, необратимые затраты в процессе, где входной и выходные потоки имеют одинаковую температуру, пропорциональны производству энтропии  $\sigma$ , так что оптимальной организации соответствует процесс минимальной диссипации.

### 0.1. Два класса систем разделения

В системах разделения можно выделить два класса:

- (1) Системы, использующие механическую или электрическую энергию, — *механические*.
- (2) Системы, использующие тепловую энергию, — *термические*.

Необратимые потери зависят не только от коэффициентов переноса, косвенно характеризующих размеры аппарата, но и от того, какой вид энергии затрачивают на разделение. Для процессов, использующих механическую энергию (мембранные процессы, центрифугирование, короткоцикловая абсорбция и др.), необратимость связана главным образом с кинетикой массообмена. При этом обратимые оценки не зависят от того, в каком порядке разделяют смесь, а значит, порядок разделения нужно искать по условию минимума  $\Delta p > 0$ .

Для процессов разделения, использующих тепловую энергию (ректификация, выпарка, сушка, абсорбционно-десорбционные циклы с изменением температуры раствора и пр.), необратимые потери связаны не только с массо- но и с теплообменом, сопровождающим преобразование тепловой энергии в работу разделения. КПД преобразования теплоты в работу разделения зависит от температур потока тепла в точках его ввода и вывода, если эти температуры для каждой из возможных границ разделения различны, то и общие затраты теплоты даже в обратимом случае зависят от порядка разделения.

Целью данной работы является анализ и оптимизация систем первого типа. Для термических систем разделения подобные задачи рассмотрены в [7, 8].

Для того, чтобы рекомендации, полученные на основе анализа необратимых затрат мощности, имели общий характер и сравнительно простую форму, введем некоторые упрощающие предположения:

- (1) Температуры и давления входного потока  $g_0$  и выходных потоков  $g_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) совпадают. Это допущение позволяет выделить только ту мощность, которая тратится на разделение.
- (2) Потоки массопереноса пропорциональны движущей силе, т.е. линейно зависят от разности химических потенциалов (кинетика Онсагера [6]). Для  $i$ -го вещества, переходящего из потока  $g_0$  в поток  $g_j$ ,

$$(4) \quad g_{ij} = \alpha_{ij} \frac{\Delta\mu_{ij}}{T}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m.$$

Здесь  $\alpha_{ij}$  — эффективный (учитывающий площадь контакта) коэффициент массопереноса при выделении  $i$ -го компонента в  $j$ -ый поток,  $\frac{\Delta\mu_{ij}}{T}$  — отнесенная к температуре разность химических потенциалов  $i$ -го компонента смеси в потоке сырья и  $j$ -ом потоке (движущая сила процесса массообмена). При этом

$$(5) \quad \Delta\mu_{ij} = \mu_{i0}(T, P_0, x_{i0}) - \mu_{ij}(T, P_j, x_{ij}).$$

Если из одного потока в другой переходят несколько веществ (фракция), то в этой формуле фигурирует разность химических потенциалов фракции.

- (3) Система реализует четкое разделение, т.е. на каждой стадии смесь делится на два потока так, что они не содержат общей компоненты. Четкое разделение возможно лишь в редких случаях, но приближенно это допущение как правило выполнено.
- (4) Будем предполагать, что свойство, использующееся для разделения компонентов смеси, можно количественно измерить и упорядочить компоненты смеси в порядке возрастания или убывания этого свойства. Например, по температуре кипения, по размерам молекул, по удельному весу и пр. Так что при разделении смеси на две фракции по границе между  $\nu$ -м и  $\nu + 1$ -м компонентами, все компоненты с номерами, меньшими или равными  $\nu$  отделяются в одну, а с номерами, большими чем  $\nu$ , — в другую фракцию.

Структуры потоков для механической и термической систем разделения при  $m = 2$  показаны на рис. 1.

При сделанных допущениях разделение бинарной смеси на отдельные компоненты происходит в одну, а смеси из  $n$  компонент — в  $(n - 1)$  стадию, на каждой из которых смесь делят на два потока. Рассмотрим задачи о выборе последовательности разделения и распределении поверхности контакта между отдельными стадиями.

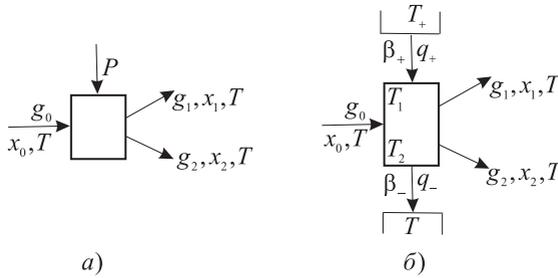


Рис. 1. Структуры потоков в механической (а) и термической (б) системах разделения

### Бинарные и псевдобинарные смеси

Разделение бинарной смеси на две компоненты или псевдобинарной на две фракции реализуется на одной стадии. Необратимые затраты мощности на разделение зависят от того, какая граница  $\nu$  выбрана для разделения. Необратимые затраты равны производству энтропии  $\sigma$ , умноженному на температуру  $T$ . В свою очередь,  $\sigma$  в процессе необратимого массопереноса может быть подсчитано, как произведение потока на движущую силу. Суммарную концентрацию компонентов с номерами меньшими или равными  $\nu$  обозначим как  $x_{\nu 1}$ , а с номерами, большими  $\nu$ , через  $x_{\nu n}$ .

Поток массопереноса определен разностью химических потенциалов  $\Delta\mu$  отделяемых компонентов в смеси и в отделяемом потоке. Этот поток равен произведению расхода смеси на концентрацией отделяемой фракции в ней  $g = g_0 x_{\nu 1}$ . С другой стороны, он пропорционален движущей силе  $g = \alpha \frac{\Delta\mu}{T}$ .

Выражая движущую силу через поток массопереноса и коэффициент массообмена, запишем необратимые затраты мощности через коэффициенты массопереноса и интенсивности потоков:

$$(6) \quad \Delta p = T\sigma = Tg_0 \left[ \frac{\Delta\mu_1}{T} + \frac{\Delta\mu_2}{T} \right] = Tg_0^2 \left[ \frac{x_{\nu 1}^2}{\alpha_{\nu 1}} + \frac{x_{\nu n}^2}{\alpha_{\nu n}} \right].$$

$\alpha_{\nu 1}, \alpha_{\nu n}$  — коэффициенты массопереноса при отделении от смеси «верхней» и «нижней» фракций.

Расчетная структура, соответствующая зависимости (6), показана на рис. 2.



Рис. 2. Структура, соответствующая расчету необратимых потерь при разделении бинарной смеси

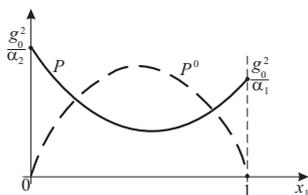


Рис. 3. Зависимость обратимых и необратимых затрат мощности от состава бинарной смеси

Переход к интенсивностям потоков и коэффициентам массопереноса, которые можно найти и по экспериментальным данным, делает анализ более общим, а результаты наглядными.

Зависимость обратимых и необратимых потерь мощности от концентрации одного из компонентов смеси показана на рис. 3. В отличие от обратимых затрат необратимая составляющая испытывает скачок при концентрации одного из компонентов, стремящейся к нулю (бедные смеси). Этот факт соответствует реальной практике, когда разделение бедных смесей, например, изотопов урана, требует гигантских затрат энергии. На обратимые оценки можно ориентироваться лишь для смесей, у которых концентрации компонентов не сильно отличаются друг от друга.

### Распределение поверхности контакта

Каждый из коэффициентов переноса зависит от характеристик отдельных компонентов и размеров аппарата (поверхности мембраны, величины центрифуги и пр.). Суммарное значение этого параметра ограничено. Будем условно называть его площадью контакта и обозначать как  $S$ , предполагая, что

$$\alpha_{\nu 1} = S_{\nu 1} \delta_{\nu 1}, \quad \alpha_{\nu n} = S_{\nu n} \delta_{\nu n}, \quad S_{\nu 1} + S_{\nu n} = S.$$

Возникает задача о таком распределении площади контакта, чтобы необратимые затраты энергии были минимальны.

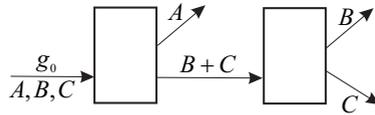


Рис. 4. Схема двухстадийного разделения трехкомпонентной смеси

Прежде чем привести ее решение, введем обозначения для *приведенных концентраций* компонентов смеси или фракций. Будем называть приведенными концентрациями  $X_{\nu 1} = \frac{x_{\nu 1}}{\sqrt{\delta_{\nu 1}}}$ ,  $X_{\nu n} = \frac{x_{\nu n}}{\sqrt{\delta_{\nu n}}}$ . Сумма приведенных концентраций, конечно, не равна единице.

С учетом введенных обозначений задача распределения поверхностей контакта примет вид:

$$(7) \quad \frac{X_{\nu 1}^2}{S_{\nu 1}} + \frac{X_{\nu n}^2}{S_{\nu n}} \Rightarrow \min / S_{\nu n} + S_{\nu 1} = S.$$

Задача (7) выпукла, ее решение единственно и имеет вид:

$$(8) \quad S_{\nu n}^* = S \frac{X_{\nu n}}{X_{\nu n} + X_{\nu 1}}, \quad S_{\nu 1}^* = S \frac{X_{\nu 1}}{X_{\nu n} + X_{\nu 1}}.$$

Таким образом, *оптимальная площадь контакта пропорциональна приведенной концентрации отделяемой фракции.*

Необратимые затраты мощности при таком распределении площади контакта зависят от  $S$  и приведенных концентраций разделяемых фракций как

$$(9) \quad \Delta p^* = \frac{Tg_0^2}{S} (X_{\nu 1} + X_{\nu n})^2,$$

*т.е. пропорциональны квадрату суммы приведенных концентраций разделяемых потоков и обратно пропорциональны суммарной площади контакта.*

### Смеси из трех компонент

Случай смеси из трех компонентов позволяет проследить, как влияет на необратимые затраты мощности порядок разделения, кроме того для многокомпонентных смесей часто требуется выделение одной промежуточной по своим физическим свойствам компоненты, что сводит задачу выделения к разделению трехкомпонентной смеси. На рис. 4 приведена схема двухстадийного разделения трехкомпонентной смеси.

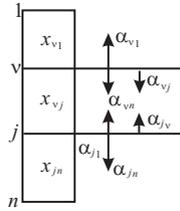


Рис. 5. К расчету оптимального порядка разделения

Проведем сравнение двух возможных границ разделения: после  $\nu$ -го и после  $j$ -го компонентов, причем  $j > \nu$ . Порядок разделения называют прямым, если на первой стадии делят по  $\nu$ -ой границе, а затем оставшуюся смесь по  $j$ -ой, и обратным, когда сначала отделяют компоненты с индексами, большими  $j$ , а на второй стадии разделяют по границе между  $\nu$ -м и  $\nu + 1$ -м компонентами (рис. 5).

Для выбора границ разделения сравним суммарные необратимые затраты энергии при прямом  $\Delta p_1$  и обратном  $\Delta p_2$  порядках разделения:

$$(10) \quad \Delta p_1 = Tg_0^2 \left[ \frac{x_{\nu 1}^2}{\alpha_{\nu 1}} + \frac{x_{\nu n}^2}{\alpha_{\nu n}} + \frac{x_{j\nu}^2}{\alpha_{j\nu}} + \frac{x_{jn}^2}{\alpha_{jn}} \right],$$

$$(11) \quad \Delta p_2 = Tg_0^2 \left[ \frac{x_{j1}^2}{\alpha_{\nu 1}} + \frac{x_{jn}^2}{\alpha_{jn}} + \frac{x_{\nu 1}^2}{\alpha_{\nu 1}} + \frac{x_{j\nu}^2}{\alpha_{\nu j}} \right].$$

Вычтем их друг из друга. Условие оптимальности прямого порядка состоит в том, что эта разность должна быть отрицательна. В противном случае оптимален обратный порядок разделения.

Разность  $\Delta p_1 - \Delta p_2$  отрицательна (прямой порядок оптимален), если справедливо неравенство:

$$(12) \quad \frac{x_{\nu n}^2}{\alpha_{\nu n}} + \frac{x_{j\nu}^2}{\alpha_{j\nu}} < \frac{x_{j1}^2}{\alpha_{j1}} + \frac{x_{j\nu}^2}{\alpha_{\nu j}}.$$

При этом коэффициент массопередачи при отделении средней фракции от первой  $\alpha_{\nu/j}$  не равен аналогичному коэффициенту при отделении средней фракции от третьей  $\alpha_{j/\nu}$ . Отметим, что величины коэффициентов переноса  $\alpha_{\nu 1}$  и  $\alpha_{jn}$  не влияют на порядок разделения.

Из неравенства (12) следует правило выбора границы разделения:

Граница разделения между  $\nu$ -м и  $\nu + 1$ -м компонентом оптимальна, если

$$(13) \quad \frac{x_{\nu n}^2}{\alpha_{\nu n}} < \min_{j>\nu} \left( \frac{x_{j1}^2}{\alpha_{j1}} + \frac{x_{j/\nu}^2}{\alpha_{\nu/j}} - \frac{x_{j\nu}^2}{\alpha_{j/\nu}} \right).$$

При разделении смеси в две и большее число стадий возникает задача распределения эффективной поверхности контакта для системы  $S$  не только между потоками на каждой стадии, но и между стадиями. Естественно распределять ее так, чтобы минимизировать суммарные необратимые потери. Нетрудно видеть, что эта задача ничем не отличается от задачи (7). Площади на каждой стадии должны быть пропорциональны сумме приведенных концентраций потоков, отделяемых на этой стадии, а суммарные необратимые потери при таком выборе пропорциональны квадрату суммы приведенных концентраций всех отделяемых потоков. Для прямого и обратного порядков разделения эти потери имеют форму:

$$(14) \quad \Delta p_1 = Tg_0^2 [X_{\nu 1} + X_{\nu n} + X_{j\nu} + X_{jn}]^2,$$

$$(15) \quad \Delta p_2 = Tg_0^2 [X_{jn} + X_{j1} + X_{\nu 1} + X_{\nu j}]^2.$$

Так как разность квадратов равна произведению разности выражений, содержащихся в квадратных скобках, на их сумму, а последняя всегда положительна, то знак разности между  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_2$  совпадает со знаком разности сумм приведенных концентраций. Отсюда вытекает правило выбора порядка разделения при оптимальном распределении площадей контакта:

*Прямой порядок разделения оптимален, если выполнено неравенство*

$$(16) \quad X_{\nu n} < \min_{j>\nu} (X_{j1} + X_{\nu j} - X_{j\nu}).$$

Здесь приведенные концентрации  $X_{\nu j}$  при отделении средней фракции от первой и  $X_{j\nu}$  при отделении ее от третьей в общем случае различны.

### Пример

Рассмотрим механическую систему разделения смеси из трех компонент с концентрациями  $x_{10} = 0.3$ ,  $x_{20} = 0.5$ ,  $x_{30} = 0.2$ . Удельные коэффициенты массопереноса равны:  $\delta_1 = 4 \frac{\text{моль}^2 \cdot \text{К}}{\text{с} \cdot \text{Дж} \cdot \text{м}^2}$ ,  $\delta_{12/3} = 2 \frac{\text{моль}^2 \cdot \text{К}}{\text{с} \cdot \text{Дж} \cdot \text{м}^2}$ ,  $\delta_{23/1} = 10 \frac{\text{моль}^2 \cdot \text{К}}{\text{с} \cdot \text{Дж} \cdot \text{м}^2}$ ,  $\delta_{2/1} = 7 \frac{\text{моль}^2 \cdot \text{К}}{\text{с} \cdot \text{Дж} \cdot \text{м}^2}$ ,  $\delta_{2/3} = 5 \frac{\text{моль}^2 \cdot \text{К}}{\text{с} \cdot \text{Дж} \cdot \text{м}^2}$ ,  $\delta_3 = 8 \frac{\text{моль}^2 \cdot \text{К}}{\text{с} \cdot \text{Дж} \cdot \text{м}^2}$ . Эффективная площадь контакта  $S = 50 \text{ м}^2$ . Необходимо выбрать

оптимальный порядок разделения смеси и распределить эффективную поверхность контакта между стадиями, то есть найти  $S_1$ ,  $S_2$ , где  $S = S_1 + S_2$ .

Определим, какую из компонент необходимо отделять на первой ступени. Для этого найдем приведенные концентрации компонентов:

$$X_{23} = (0,5 + 0,2)/\sqrt{10} = 0,22, \quad X_{12} = (0,3 + 0,5)/\sqrt{2} = 0,57,$$

$$X_{2/1} = 0,5/\sqrt{7} = 0,189, \quad X_{2/3} = 0,5/\sqrt{5} = 0,224.$$

Подставляя эти значения в неравенство (16), находим, что его левая часть равна 0,22, а правая равна 0,605. Значит на начальной стадии целесообразно отделять первый компонент смеси.

Сумма двух приведенных концентраций на первой ступени равна 0,374, а на второй равна 0,294. так что площадь контакта на первой стадии должна быть равной 28 м<sup>2</sup>, а на второй — 22 м<sup>2</sup>.

### Заключение

При ряде упрощающих допущений на основе методов оптимизационной термодинамики получены расчетные соотношения для выбора последовательности разделения многокомпонентных смесей по условию минимума затрат работы в механических системах с фиксированной производительностью и по распределению площади контакта между ступенями разделения и потоками на каждой ступени.

### Список литературы

- [1] R. S. Berry, V. A. Kasakov, S. Sieniutycz, Z. Szwast, A. M. Tsirlin. *Thermodynamic optimization of finite time processes*, Wiley, Chichester, 1999. ↑<sup>33</sup>
- [2] А. М. Цирлин. *Необратимые оценки предельных возможностей термодинамических и микроэкономических систем*, Наука, М., 2003. ↑<sup>33</sup>
- [3] I. I. Novikov. "The efficiency of atomic power stations", *J. Nucl. Energy*, 7:1–2 (1958), pp. 125–128. ↑<sup>33</sup>
- [4] Л. И. Розоноэр, А. М. Цирлин. «Оптимальное управление термодинамическими системами. I–III», *Автоматика и телемеханика*, 1983, №1, с. 70–79; 1983, №2, с. 88–101; 1983, №3, с. 50–64. ↑<sup>33</sup>
- [5] Ф. Бошнякович. *Техническая термодинамика*, ГЭИ, М., 1955. ↑<sup>33</sup>
- [6] И. Пригожин, Р. Дефей. *Химическая термодинамика*, Наука, М., 1966. ↑<sup>33, 34, 36</sup>
- [7] А. М. Tsirlin, A. I. Balunov, I. A. Sukin. "Estimates of energy consumption and selection of optimal distillation sequence for multicomponent distillation", *Theor. Found. Chem. Eng.*, 50:3 (2016), pp. 250–259. ↑<sup>35</sup>

- [8] С. А. Амелькин, И. М. Бурцлер, К. Х. Хоффман, А. М. Цирлин. «Оценка предельных возможностей процессов разделения», *Теор. основы хим. технологии*, **35:3** (2001), с. 232–238. ↑<sup>35</sup>

Пример ссылки на эту публикацию:

В. С. Овсепян, А. М. Цирлин. «Выбор термодинамически-оптимальной последовательности разделения многокомпонентных смесей в системах, использующих механическую энергию», *Программные системы: теория и приложения*, 2017, **8:2**(33), с. 33–44.

URL: [http://psta.psir.ru/read/psta2017\\_2\\_33-44.pdf](http://psta.psir.ru/read/psta2017_2_33-44.pdf)

Об авторах:

#### **Вардгес Седракович Овсепян**



К.т.н., доцент Ванадзорского государственного университета им. Ов. Туманяна, Армения. Руководил разработкой методов оптимизации, информационных систем, систем управления технологическими процессами и программными системами. Автор 90 научных трудов, докладов и 6 учебников по информатике, Языкам Turbo Pascal for Windows, Visual Basic, C++ и др.

e-mail: [hovar@inbox.ru](mailto:hovar@inbox.ru)

#### **Анатолий Михайлович Цирлин**



Д.т.н, гл.н.с. ИЦСА ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, Области исследований: теория оптимального управления, условия оптимальности усредненных задач, термодинамика при конечном времени, термодинамический подход к анализу экономических систем

e-mail: [tsirlin@sarc.botik.ru](mailto:tsirlin@sarc.botik.ru)

Vardges Hovsepyan, Anatolij Tsirlin. *Choice–thermodynamically optimal sequence of separation of multicomponent systems that use mechanical energy.*

ABSTRACT. The problem of the procedure for the separation of multicomponent mixtures in systems using mechanical or electrical energy, minimizing the cost of energy in the processes of a given performance, and the optimal distribution of contact surfaces between the stages of separation. (*In Russian*).

*Key words and phrases:* separation of mixtures, mnogokomponentnye mixture, irreversible power costs, optimal order splitting.

### References

- [1] R. S. Berry, V. A. Kasakov, S. Sieniutycz, Z. Szwast, A. M. Tsirlin. *Thermodynamic Optimization of Finite Time Processes*, Wiley, Chichester, 1999.
- [2] A. M. Tsirlin. *Irreversible Estimates of Limiting Possibilities of Thermodynamic and Microeconomic Systems*, Nauka, M., 2003 (in Russian).
- [3] I. I. Novikov. “The Efficiency of Atomic Power Stations”, *J. Nucl. Energy*, **7**:1–2 (1958), pp. 125–128.
- [4] L. I. Rozonoer, A. M. Tsirlin. “Optimal Control of Thermodynamic Processes. I–III”, *Autom. Remote Control*, **44**:1 (1983), pp. 55–62; **44**:2 (1983), pp. 209–220; **44**:3 (1983), pp. 314–326.
- [5] F. Bosnjakovic. *Technical Thermodynamics*, Holt, Rinehart and Winston, 1965.
- [6] I. Prigogine, R. Defay. *Chemical Thermodynamics*, Longmans Green and Co, London, 1954.
- [7] A. M. Tsirlin, A. I. Balunov, I. A. Sukin. “Estimates of Energy Consumption and Selection of Optimal Distillation Sequence for Multicomponent Distillation”, *Theor. Found. Chem. Eng.*, **50**:3 (2016), pp. 250–259.
- [8] S. A. Amel’kin, J. M. Burtzler, K. H. Hoffmann, A. M. Tsirlin. “Estimates of Limiting Possibilities of Separation Processes”, *Theor. Found. Chem. Tech.*, **35**:3 (2001), pp. 217–223.

### Sample citation of this publication:

Vardges Hovsepyan, Anatolij Tsirlin. “Choice–thermodynamically optimal sequence of separation of multicomponent systems that use mechanical energy”, *Program systems: Theory and applications*, 2017, **8**:2(33), pp. 33–44. (*In Russian*).

URL: [http://psta.psiras.ru/read/psta2017\\_2\\_33-44.pdf](http://psta.psiras.ru/read/psta2017_2_33-44.pdf)