

УДК 66.047-932.2

Н.А. Артюхова<sup>1</sup>,  
 А.Б. Шандыба<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
 А.Е. Артюхов<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.

1 – Сумський державний університет, г. Суми, Україна, e-mail: artemijar@yandex.ru  
 2 – Сумський національний аграрний університет, г. Суми, Україна, e-mail: environnement@i.ua

## ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ КОНЦЕНТРАТОВ И МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

N.A. Artyukhova<sup>1</sup>,  
 A.B. Shandyba<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,  
 A.Ye. Artyukhov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor

1 – Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: environnement@i.ua  
 2 – Sumy National Agrarian University, Head of the Protection of Labour Department, Sumy, Ukraine, e-mail: artemijar@yandex.ru

## ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF MULTI-STAGE CONVECTIVE DRYING OF CONCENTRATES AND MINERAL RAW MATERIALS

**Цель.** Обоснование возможности уменьшения энергетических затрат в процессах сушки за счёт секционирования внутреннего рабочего объема аппарата различными конструкциями полочных контактов и рационального взаимодействия потоков материала и сушильного агента.

**Методика.** Представленные данные получены на основании теоретического анализа интенсивности тепломассообмена, условий формирования взвешенного слоя, дифференцированной эффективности ступеней с точки зрения сокращения затрат на сушку. Предложенная методика оценки энергоэффективности процессов обезвоживания концентратов и минерального сырья учитывает особенности многоступенчатых полочных аппаратов.

**Результаты.** Показано, что при использовании многоступенчатых сушилок возможно снижение энергетических затрат за счёт рациональной конструкции полочных контактов. Интегральные аналитические зависимости позволяют оптимизировать эффективность каждой ступени сушилки и приведенные затраты на проведение процесса.

**Научная новизна.** Впервые получены результаты, которые подтверждают, что достичь снижения энергетических затрат возможно за счёт повышения эффективности каждой ступени сушилки. Показана возможность использования полочных сушилок для обезвоживания широкой номенклатуры концентратов и минерального сырья.

**Практическая значимость.** Представленные результаты теоретических исследований положены в основу разработки методики инженерного расчёта многоступенчатых полочных сушилок. На основании полученных результатов разработаны усовершенствованные конструкции полочных сушилок, защищённые охранными документами.

**Ключевые слова:** многоступенчатая сушилка, секционирование внутреннего объема, тепломассообмен, энергетическая эффективность, оптимизация конструктивных решений

**Введение.** В процессах обогащения полезных ископаемых, при выпуске готового продукта, сушка материала является завершающей подготовительной стадией. Применение дополнительной операции тепловой сушки на этапе обогащения сырья наряду с механическим обезвоживанием (гравитационные, фильтрационные и другие механические методы) объясняется следующими причинами:

- обеспечение допустимой влажности материала для его дальнейшей транспортировки (например, содержание влаги в концентратах неметаллических материалов (тальк, графит, калийные соли и др.) не должно превышать 1–2%, а часто и долей процента);

- за счёт снижения влажности разделяемого материала достигаются хорошие условия его электризации, что является необходимым условием для осу-

ществления успешной электросепарации (электростатические и электромагнитные методы).

В то же время, тепловая сушка является одним из наиболее сложных и энергоёмких процессов, которые используются в химической и смежных с ней отраслях промышленности.

**Анализ последних публикаций.** В зависимости от способа подвода тепла к высушиваемому материалу различают несколько видов сушки, из которых в настоящее время для обезвоживания концентратов и минерального сырья наиболее востребованы следующие [1]:

- конвективная сушка, осуществляемая при непосредственном соприкосновении высушиваемого материала с сушильным агентом (воздух, инертные и дымовые газы, перегретый пар);

- контактная сушка, которая основана на передаче тепла от теплоносителя к материалу через разделяющую их перегородку.

Реализация указанных видов сушки осуществляется в аппаратах различной конструкции в зависимо-

сти от начальных свойств высушиваемого материала и требуемой его конечной влажности.

Даже учитывая тот факт, что энергетические затраты во время проведения процесса обезвоживания материала конвективным способом не являются самыми низкими (в сравнении с другими видами сушки), за счёт других многочисленных преимуществ наибольшее распространение получили именно конвективные сушилки [2]. Сушильные аппараты с косвенным теплообменом находят применение только в том случае, если имеется вероятность загрязнения или изменения цвета высушиваемого материала.

Одним из способов конвективной сушки является контакт высушиваемого материала с сушильным агентом во взвешенном или полувзвешенном состоянии. Он может осуществляться в барабанных сушилках, аппаратах со взвешенным слоем, пневматических трубах-сушилках [3]. Указанные типы оборудования имеют определённые недостатки: барабанные сушилки и аппараты со взвешенным слоем имеют большие габариты и значительную энергоёмкость; пневматические трубы-сушилки не обеспечивают необходимое время контакта высушиваемого материала с сушильным агентом и характеризуются большой высотой.

Контакт фаз во взвешенном слое характеризуется такими преимуществами [4]:

- возможность равномерного прогрева высушиваемого материала, позволяющий использовать высокотемпературный сушильный агент;
- интенсивное движение высушиваемого материала, близкое к режиму идеального перемешивания;
- обеспечение максимальной поверхности контакта высушиваемого материала и сушильного агента;
- сравнительно небольшое гидравлическое сопротивление слоя высушиваемого материала;
- простота конструкции сушилки.

Применение техники взвешенного слоя приводит к снижению эффективности процесса сушки вследствие следующих причин:

- в ряде случаев, в аппарате взвешенного слоя наблюдается неравномерность пребывания высушиваемого материала, одинаково возможен как его быстрый проскок, так и пребывание в слое дольше необходимого (по результатам расчёта кинетики процесса обезвоживания) времени;
- отсутствие механизма управления траекторией движения и временем пребывания высушиваемого материала во взвешенном слое в случае необходимости обеспечения кратковременного или пролонгированного контакта с сушильным агентом;
- нежелательное изменение свойств высушиваемого материала (истирание, растрескивание, нарушение структуры ядра, агломерация и т.д.);
- необходимость установки в составе схемы мощных пылеулавливающих аппаратов на выходе сушильного агента из взвешенного слоя;
- эрозия аппаратуры в зоне взвешенного слоя, особенно значительная при сушке материала с высокими абразивными свойствами;

- низкая стабильность взвешенного слоя в широком диапазоне изменения нагрузок по высушиваемому материалу и сушильному агенту.

Применение аппаратов взвешенного слоя с вертикальным секционированием внутреннего пространства за счёт установки перфорированных полочных контактов позволяет уменьшить влияние указанных выше дестабилизирующих взвешенный слой факторов [5].

Учитывая, что до настоящего времени аппараты такого типа в основном использовались лишь как охладители и классификаторы [6,7], актуальной является проблема оценки энергетической эффективности такого оборудования в применении к процессу сушки. **Целью** представленной статьи является обоснование возможности уменьшения энергетических затрат на осуществление процесса сушки за счёт:

- подбора оптимального гидродинамического режима работы полочной сушилки;
- выбора оптимальной конструкции полочного контакта на каждой ступени;
- рациональной организации движения потока сушильного агента.

**Постановка задачи.** Задача работы – разработка методики оценки энергетической эффективности процесса обезвоживания концентратов и минерального сырья в многоступенчатых полочных аппаратах.

Для решения поставленной задачи необходимым является изучение следующих вопросов:

- определение кинетических параметров процесса сушки на каждой из ступеней полочного аппарата (изменение температуры и влажности сушильного агента и высушиваемого материала);
- оценка эффективности отдельной ступени в полочном аппарате с каскадом полок;
- анализ факторов, влияющих на необходимое время пребывания высушиваемого материала на отдельной ступени и в объёме полочного аппарата;
- подбор рациональной организации движения сушильного агента в полочной сушилке;
- выбор оптимального соотношения потоков сушильного агента и высушиваемого материала;
- анализ энергетической эффективности процесса сушки с учётом гидродинамических и кинетических характеристик сушильного агента и высушиваемого материала;
- разработка усовершенствованных конструкций полочных сушилок на основании данных аналитических и экспериментальных исследований.

Полученные результаты позволят подобрать такой режим работы полочной сушилки (с учётом исходных характеристик высушиваемого материала и требований к качеству конечного продукта), который обеспечит минимальные энергетические расходы на создание взвешенного слоя в аппарате и нагревание сушильного агента.

Принципиальная схема полочной сушилки представлена на рис. 1.

Работа выполнена в рамках фундаментальных научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Украины „Разработка и исследова-

ние высокоэффективных аппаратов для процессов массообмена, кристаллизации и классификации“ (№0110U001953).

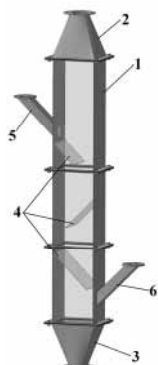


Рис. 1. Принципиальная схема гравитационной полочной сушилки: 1 – корпус; 2 – коническая царга с патрубком выхода сушильного агента; 3 – коническая царга с патрубком выгрузки высушенного материала; 4 – полочный контакт; 5 – патрубок ввода влажного материала; 6 – патрубок ввода сушильного агента

**Материалы исследований.** Запишем одну из наиболее распространённых экспоненциальных моделей теплопереноса в процессе конвективной сушки в виде изменения температуры частицы по радиусу во времени  $t_{(r,\tau)}$  [8]

$$\frac{t_{(r,\tau)} - t_{mn}}{t_{ch} - t_{mn}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin \mu_n \frac{r}{R}}{\mu_n \frac{r}{R}} \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (1)$$

где  $t_{mn}$  – начальная температура материала, подвергаемого сушке;  $t_{ch}$  – начальная температура сушильного агента;  $r$  – текущий радиус частицы;  $R$  – максимальный радиус частицы (характерный размер);  $A_n, \mu_n$  – постоянный коэффициент и корень характеристического уравнения;  $Fo$  – критерий Фурье.

Для периода постоянной скорости сушки время сушки принимают равным времени прогрева поверхности частиц до температуры адиабатного испарения жидкости (при небольшом количестве удаляемой влаги).

С учётом того, что на поверхности частицы  $r = R$  при значении критерия Фурье  $Fo = \frac{a_m \cdot \tau}{R^2}$  (где  $a_m$  – коэффициент температуропроводности материала;  $\tau$  – время сушки), уравнение (1) запишется в виде

$$\frac{t_{нов} - t_{mn}}{t_{ch} - t_{mn}} = 1 - A_n \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} \exp(-\mu_n^2 \cdot \frac{a_m \cdot \tau}{R^2}), \quad (2)$$

где  $t_{нов}$  – температура поверхности частицы, °С.

Анализ уравнения (2) при граничных условиях ( $\tau = 0, \tau = \infty$ ) показал, что тождество левой и правой части достигается при  $A_n = \frac{\mu_n}{\sin \mu_n}$ .

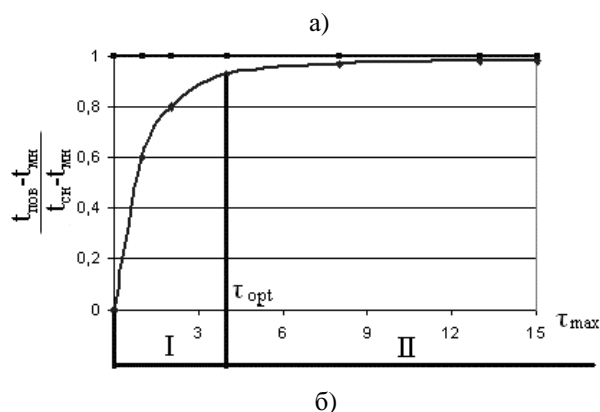
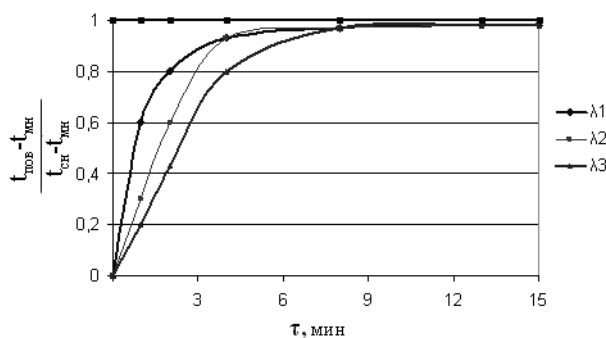


Рис. 2. Кривые интенсивности прогрева материала в зависимости от его теплопроводности ( $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ ) (а); основные участки кривой интенсивности прогрева материала (б)

Анализ рис. 2 показывает, что кривую условно можно разделить на два участка, которые имеют различную интенсивность прогрева. На участке I интенсивность прогрева материала больше и время, за которое материал достигнет заданной температуры, значительно меньше, чем на участке II. Оптимальное время прогрева материала соответствует началу перегиба кривой. Таким образом, для уменьшения времени сушки (при сохранении характеристик сушильного агента), и, как следствие, снижения затрат на нагрев и нагнетание сушильного агента в рабочее пространство сушилки, рациональным решением является проведение многоступенчатой сушки. При этом на каждой ступени прогрев материала будет проходить в промежуток времени  $\tau_{opt}$ .

Для определения кинетических параметров процесса конвективной сушки в многоступенчатых аппаратах предложено [9] использовать систему уравнений, позволяющих определить температуру и влажность потоков высушиваемого материала и сушильного агента на каждой ступени (начальную на входе в неё и конечную на выходе) сушилки:

- уравнение кинетики сушки относительно температуры зернистого материала и сушильного агента;
- уравнение кинетики сушки по влажности зернистого материала и сушильного агента;
- уравнение теплового баланса потоков зернистого материала и сушильного агента;
- уравнение материального баланса по влажности потоков зернистого материала и сушильного агента.

Учитывая, что свойства сушильного агента и высушиваемого материала изменяются от ступени к ступени, кинетика прогрева и обезвоживания высушиваемого материала (охлаждения и увлажнения сушильного агента) на каждой ступени отличны друг от друга. На каждой последующей ступени удаление влаги из материала происходит с меньшей интенсивностью, что приводит к увеличению энергетических затрат.

Каждая из ступеней сушилки характеризуется определённым значением эффективности, которая зависит от соотношения потоков высушиваемого материала и сушильного агента, временем пребывания высушиваемого материала в пределах каждой ступени и интенсивностью тепломассообмена. Все эти параметры учитываются в обобщённом критерии эффективности  $i$ -й ступени

$$E = \frac{1 - \exp\left[-K_i \cdot \tau_{ni} \cdot \left(1 + \frac{V_m}{V_c}\right)\right]}{1 + \frac{V_m}{V_c}}, \quad (3)$$

где  $K$  – обобщённый коэффициент интенсивности тепломассообмена на ступени;  $\frac{V_m}{V_c}$  – соотношение потоков высушиваемого материала и сушильного агента на ступени;  $\tau_n$  – время пребывания высушиваемого материала на ступени.

Следует отметить, что при проведении процесса сушки концентратов и минерального сырья в аппаратах полочного типа минимальный расход сушильного агента  $V_{c\min}$  диктуется условиями создания взвешенного слоя на полочном контакте. Характерным технологическим параметром в этом случае является скорость сушильного агента, соответствующая началу взвешивания материала (первая критическая скорость). Определяется она на основании анализа сил, действующих на частицу, по такому соотношению

$$W_{нв}^2 = \left(\frac{V_{c\min}}{\varepsilon \cdot S}\right)^2 = \frac{3 \cdot d}{4\zeta \cdot \rho_c} (\rho_m - \rho_c) \cdot g, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – порозность взвешенного слоя;  $S$  – площадь свободного сечения сушилки;  $d$  – эквивалентный диаметр частиц высушиваемого материала;  $\zeta$  – коэффициент аэродинамического сопротивления частиц высушиваемого материала;  $\rho_m, \rho_c$  – плотность

сушильного агента и высушиваемого материала соответственно;  $g$  – ускорение свободного падения.

Проведём анализ входящих в уравнение (3) переменных с точки зрения энергетических затрат на проведение процесса сушки.

Значение коэффициента  $K$  зависит от природы высушиваемого материала и сушильного агента, гидродинамического и термодинамического режимов работы сушилки. В таком случае, одним из методов снижения энергетических затрат является создание такой гидродинамической обстановки в аппарате, которая характеризовалась бы минимальным расходом сушильного агента  $V_{c\min}$  при заданных размерах высушиваемого материала.

Время пребывания высушиваемого материала на ступени  $\tau_n$  зависит от геометрических характеристик полочного контакта (угла наклона к горизонту, длины, характера перфорации) и расхода сушильного агента. Изменяя геометрию полочного контакта, при неизменном расходе сушильного агента, представляется возможным увеличивать или уменьшать время пребывания высушиваемого материала на отдельной ступени и в аппарате в целом для обеспечения условия  $\tau_{opt} \approx \tau_n$ . На каждой ступени время пребывания определяется интенсивностью прогрева материала, которая не является постоянной величиной вследствие изменения температуры сушильного агента. Поэтому каждая ступень полочной сушилки может иметь различные геометрические характеристики.

Уменьшение соотношения расходов высушиваемого материала и сушильного агента  $\frac{V_m}{V_c}$  приводит не только к увеличению эффективности сушки, но и к повышению энергетических затрат на проведение процесса. Подбор рациональной организации движения потока сушильного агента в пределах аппарата является в этом случае важным этапом оптимизационного расчёта. На этапе предварительного расчёта сушилки проверяются следующие варианты движения сушильного агента относительно высушиваемого материала:

- противоточное движение;
- противоточное движение с частичной рециркуляцией;
- противоточное движение с байпасом части потока и вводом её на отдельные ступени сушилки.

Значение всех входящих в формулу (3) параметров должно быть подобрано таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность каждой ступени.

Максимальная эффективность достигается при значении числителя формулы (3), стремящемся к единице, в этом случае

$$E = \frac{1}{1 + \frac{V_m}{V_c}}. \quad (5)$$

Такое значение  $E$  достигается при длительном времени пребывания материала на полочном контакте, когда в числителе дроби (3)  $\exp\left[-K_i \cdot \tau_{ni} \cdot \left(1 + \frac{V_m}{V_c}\right)\right] \rightarrow 0$ .

При таком варианте ведения процесса важным становится подбор оптимального соотношения потоков высушиваемого материала и сушильного агента. Для оценки удельных затрат энергетических ресурсов примем постоянным расход высушиваемого материала.

Повышение турбулентности потока сушильного агента при прохождении через слой высушиваемого материала в режиме взвешенного слоя приводит к более быстрому росту затрат энергии, чем скорости сушки и эффективности процесса. Можно сказать, что, при некоторых максимальных значениях скорости потока сушильного агента и степени его турбулизации (которой соответствует максимальный его расход), процесс становится экономически невыгодным.

Запишем удельную стоимость дополнительных энергоресурсов для интенсификации процесса теплопередачи при сушке в виде двучленной целевой функции

$$F = \frac{c \cdot V_c + B}{M}, \quad (6)$$

где  $c$  – стоимость энергоресурса;  $B$  – производственная составляющая стоимости продукта без затрат на сушку;  $M$  – производительность процесса по удаленной влаге.

Диапазон колебаний соотношения расхода высушиваемого материала к расходу сушильного агента ограничивается аэродинамическими условиями существования взвешенного слоя и скоростью уноса маленьких частиц продукта. С другой стороны, недостаточное количество теплоносителя не обеспечивает необходимое качество сушки. Оптимизационная задача, таким образом, заключается в определении минимального соотношения расхода сушильного агента и производительности согласно обоснованным технико-экономическим показателям сушки. Значение расхода сушильного агента, соответствующее предельной скорости, вычисленной по формуле (4) при различных значениях порозности, в дальнейшем становится параметром оптимизации при оценке целесообразности повышения турбулизации движения потоков в формуле (6).

Наиболее распространенной функцией, аппроксимирующей рост производительности процесса сушки по удаленной влаге в зависимости от расхода сушильного агента (или соотношения расхода при фиксированном значении расхода высушиваемого материала), является степенная функция вида (рис. 3)

$$M \sim V_c^n, \quad (7)$$

где  $n$  – показатель степени, зависящий от монодисперсности материала и характеристики его поверхности.

Подставляя зависимость производительности  $M$  из (7) в целевую экономическую функцию удельных затрат (6), получим выражение

$$F = \frac{c \cdot V_c + B}{V_c^n} = c \cdot V_c^{1-n} + B \cdot V_c^{-n}. \quad (8)$$

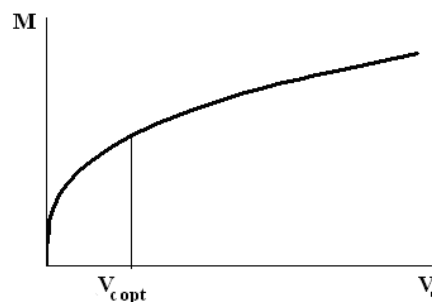


Рис. 3. Влияние расхода сушильного агента на интенсивность удаления влаги из материала

Минимум функции удельных затрат достигается при

$$\frac{dF}{dV_c} = 0$$

или

$$c \cdot (1-n) \cdot V_c^{-n} - B \cdot n \cdot V_c^{-(1+n)} = 0. \quad (9)$$

Отсюда после преобразований получим значение оптимальных расходов теплоносителя при фиксированных экономических параметрах  $a$  и  $B$

$$V_c^{-n} [c \cdot (1-n) - B \cdot n \cdot V_c^{-1}] = 0$$

или, пренебрегая тривиальным корнем  $V_c^{-n} = 0$ ,

$$V_c = \frac{B \cdot n}{c(1-n)}. \quad (10)$$

Увеличение показателя  $n$  степенной функции (7) приводит к повышению эффективности удаления влаги из зернистого материала при сохранении расхода сушильного агента. Для удаления заданного количества влаги с увеличением показателя становится возможным уменьшение количества сушильного агента. При предельных значениях показателя  $n$  (рис. 4) процесс обезвоживания осуществляться не будет (при  $n = 0$ ) или будет достигнута максимальная эффективность процесса удаления влаги (при  $n = 1$ ).

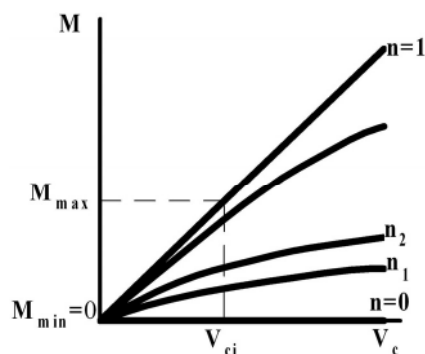


Рис. 4. Интенсивность удаления влаги из материала в зависимости от показателя  $n$

Сопоставление расхода сушильного агента, который соответствует режиму перехода зернистого материала во взвешенное состояние в соответствии с уравнением (4), и оптимального расхода с точки зрения экономических показателей по формуле (6) дает возможность подобрать технологические параметры работы сушилки, соответствующие стабильному аэродинамическому режиму и минимальным затратам на обезвоживание.

**Выводы.** Результаты представленных исследований показывают, что применение процесса многоступенчатой сушки в аппаратах с вертикальным секционированием рабочего пространства позволяет достаточно эффективно использовать тепловую энергию сушильного агента. При этом представляется возможным обеспечение максимальной эффективности работы каждой ступени за счёт варьирования конструктивными характеристиками полочного контакта. Подбор рациональной организации движения сушильного агента в аппарате также оказывает существенное влияние на снижение энергетических затрат, что особенно важно, когда имеется необходимость его подогрева до высоких температур.

Универсальность конструкции сушилки при широкой номенклатуре высушиваемых в горнодобывающей промышленности материалов (различные физико-химические, термодинамические свойства и фракционный состав) позволит также снизить расходы на модернизацию установки подготовки сырья к обогащению. Достичь этого снижения можно за счёт изменения конструкции полочных контактов, обеспечивающих необходимое время пребывания конкретного материала в сушилке.

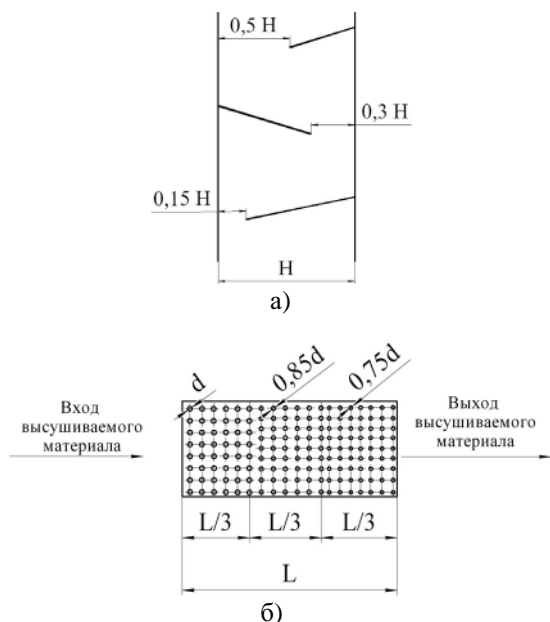


Рис. 5. Методы усовершенствования конструкции полочной сушилки: а – изменение величины зазора между полочным контактом и стенкой аппарата по высоте; б – изменение характера перфорации полочного контакта по его длине

Полученные результаты также положены в основу разработки усовершенствованных устройств для сушки дисперсных материалов (рис. 5) [10].

**Список литературы / References**

1. Коновалов В.И. Современные вопросы теории переноса при сушке / В.И. Коновалов, Т. Кудра, Н.Ц. Гатапова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Том 14, № 3. – С. 538–559.
2. Павлыш В.Н. Математическое моделирование процесса обезвоживания увлажненной горной массы / В.Н. Павлыш, И.В. Тарабаева // Физико-технические проблемы горного производства. – 2009. – Вып. 12. – С. 103–107.
3. Павлыш, V.N. and Tarabaeva, I.V. (2009), “Mathematical simulation of the wet rock dehydration process”, *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Gornogo Proizvodstva*, Volume 12, pp. 103–107.
4. Техника и технологии псевдоожижения: процессы термообработки и вулканизации / [Дворецкий С.И., Королёв В.Н., Нагорнов С.А. и др.]. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 232 с.
5. Dvoretzkiy, S.I., Korolev, V.N. and Nagornov, S.A. (2006), *Tekhnika i tekhnologii psevdoozhizheniya: protsessy termoobrabotki i vulkanizatsii* [Technique and Technologies of Fluidization: Heat Treatment and Vulcanization Processes], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
6. Поперечный А. М. Аналіз конструктивних особливостей сушарок із псевдозрідженим шаром і перспективи їх удосконалення / А.М. Поперечний, І.В. Жданов // Обладнання та технології харчових виробництв. – 2009. – Вип. 20. – С. 44–52.
7. Поперечний, А.М. and Zhdanov, I.V. (2009), “Analysis of fluidized bed dryers structural features and prospects of their improvement”, *Obladnannia ta Tekhnologii Kharchovykh Vyrobnystv*, Volume 20, pp. 44–52.
8. Artiukhova, N.A. and Yukhymenko, N.P. (2012), “Multistaged drying-classification apparatus of energy recover”, *Proc. of the 2nd Int. Kazakhstan-Russian Conference on Chemistry and Chemical Engineering*, E.A. Buketov Karaganda state university, Karaganda, Kazakhstan, Volume 1, pp. 41–43.
9. Донат Е.В. Аппараты со взвешенным слоем для интенсификации технологических процессов / Е.В. Донат, А.И. Голобурдин. – Л.: Химия, 1993. – 144 с.
10. Donat, Ye.V. and Goloburdin, A.I. (1993), *Apparaty so vzveshennym sloem dlya intensifikatsii tekhnologicheskikh protsessov* [Apparatus With a Fluidized Bed for Intensification of Technological Processes], Khimiya, Leningrad, Russia.
11. Barsky, E. and Barsky, M. (2004), “Master curve of separation processes”, *Physical Separation in Science and Engineering*, Volume 13, no. 1, pp. 1–13.

8. Апарати завислого шару. Теоретичні основи й розрахунок / [Юхименко М.П., Вакал С.В., Кононенко М.П. та ін.] – Суми: Собор, 2003. – 304 с.

Yukhymenko, N.P., Vakal, S.V. and Kononenko, M.P. (2003), *Aparaty zavysloho sharu. Teoretychni osnovy i rozrakhunok* [Fluidized Bed Apparatus. Theoretical Basis and Calculation], Sobor, Sumy, Ukraine.

9. Шандиба Н.О. Методика рекурентного розрахунку гравітаційної полицної сушарки / Н.О. Шандиба, М.П. Юхименко // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2011. – Вип. 39, Т. 2. – С. 44–48.

Shandyba, N.O. and Yukhymenko, N.P. (2011), “Recurrent calculation method of the gravitational shelf dryers”, *Naukovi Pratsi Odeskoi Natsionalnoi Akademii Kharchovykh Tekhnologii*, issue 39, Volume 2, pp. 44–48.

10. Патент на корисну модель №74070 Україна МПК F26B 3/02 (2006/01), F26B 17/12 (2006/01). Пристрій для сушіння дисперсних матеріалів / Артюхова Н.О., Юхименко М.П., Артюхов А.Є., Шандиба О.Б. – №u201205954; Заявлено 16.05.2012; Надрук. 10.10.2012, Бюл. №19, 2012 р.

Artyukhova, N.A., Yukhymenko, N.P., Artyukhov, A.Ye. and Shandyba, A.V. (2012), Patent no.74070, “Device for drying of dispersed materials”, Ukraine.

**Мета.** Обґрунтування можливості зменшення енергетичних витрат на здійснення сушіння за рахунок застосування багатоступневих полицних апаратів з різними конструкціями полицних контактів і раціональної організації руху потоку сушильного агента.

**Методика.** Представлені результати отримані на підставі теоретичного аналізу інтенсивності прогрівання матеріалу, умов формування зваженого шару в апараті та ефективності кожного ступеня, цільової функції витрат на сушіння. Запропонована методика оцінки енергоефективності процесів зневоднення концентратів і мінеральної сировини враховує особливості багатоступневих полицних апаратів.

**Результати.** Показано, що при використанні багатоступневих полицних сушарок можливе зниження енергетичних витрат за рахунок раціонального підбору конструкції полицного контакту та руху сушильного агента. Отримані аналітичні залежності дозволяють оцінити ефективність кожного ступеня полицної сушарки та приведені витрати на сушіння.

**Наукова новизна.** Уперше отримані результати, які підтверджують, що досягти зниження енергетич-

них витрат можливо за рахунок підвищення ефективності кожного ступеня сушарки. Показана можливість застосування полицних сушарок для зневоднення широкої номенклатури концентратів і мінеральної сировини.

**Практична значимість.** Представлені результати теоретичних досліджень покладено в основу розробки методики інженерного розрахунку багатоступневих полицних сушарок. На підставі отриманих результатів розроблено вдосконалені конструкції полицних сушарок, що захищені охоронними документами.

**Ключові слова:** багатоступнева сушарка, енергетична ефективність, раціональний режим, оптимальна конструкція

**Purpose.** To substantiate the possibility of the drying energy costs reduction through implementation of multi-stage shelf apparatus with different shelf contacts designs and rational organization of drying agent flow.

**Methodology.** The results presented in the article, were obtained by the theoretical analysis of the material heating intensity, the conditions for the fluidized bed forming in the apparatus and the efficiency of each stage considering drying cost reduction. The developed methodology for the concentrates and mineral raw materials drying energy efficiency assessment takes into account the features of multi-stage shelf apparatus.

**Findings.** It is shown that the implementation of multi-stage shelf dryers can reduce the energy costs by the rational selection of shelf contacts designs and the mode of drying agent movement. We have obtained the analytical dependences allowing us to optimize the efficiency of each stage of shelf dryer and unit drying costs.

**Originality.** For the first time we have obtained the results confirming that the achievement of energy costs reducing is possible by the improvement of the efficiency on each dryer stage. The applicability of the shelf dryers for dehydration of a wide range of concentrates and mineral raw materials is presented.

**Practical value.** The presented results of theoretical research are the basis for engineering calculation methods development of multi-stage shelf dryers. Based on the results the improved shelf dryers designs have been developed and granted by title of protection.

**Keywords:** multi-stage dryer, energy efficiency, rational regime, optimal design

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Л.Г. Філатовим. Дата надходження рукопису 21.05.13.*