

# Гидродинамические условия экстрагирования и эффективность работы диффузионных установок

**Н.Н. ПУШАНКО**, д-р техн. наук, проф., (044) 287-93-32

Национальный университет пищевых технологий

**В.Н. КУХАР**, генеральный директор (050) 469-11-08, **А.Н. ПАРАХОНЯ**, инженер, (097) 954-98-86

Фирма «ТМА»

Для извлечения сахарозы диффузионным способом свеклосахарные заводы России, Украины и других стран СНГ, перерабатывающие 3, 6 или 12 тыс. т свеклы в сутки, чаще всего используют аппараты наклонного типа, колонные и ротационные диффузионные установки [8].

Разные по производительности, они имеют существенные конструктивные отличия: по количеству единиц — одноаппаратные (наклонные) и многоаппаратные (ротационные, колонные); по форме корпусов — корытные и цилиндрические; по типу транспортных систем — шнековые и лопастные.

К современным диффузионным аппаратам, в которых сахароза извлекается из свекловичной стружки различного качества с разной формой поперечного сечения, предъявляются следующие требования: высокая производительность при низких потерях сахарозы в жоме; получение диффузионного сока с высокой чистотой и концентрацией сухих веществ; достижение минимальной величины неучтенных потерь сахарозы при экстрагировании; использование смеси барометрической и жомпресовой воды как экстрагента; низкая температура диффузионного сока; простота конструкции и надежность работы.

Уровень выполнения этих требований аппаратами и установками разных типов определяется интенсивностью тепломассообменных

процессов, которые осуществляются в основном и вспомогательном оборудовании современных диффузионных установок. Методы исследования и результаты изучения интенсивности тепломассообмена и его влияния на эффективность непрерывной работы диффузионных установок и качество получаемого диффузионного сока приведены в работах [3, 5, 6].

К основным факторам, определяющим гидродинамические условия экстрагирования сахарозы, влияющим на качество работы диффузионных установок непрерывного действия, относятся:

- размер, форма и качество свекловичной стружки;
- соотношение твердой (стружка) и жидкой (экстрагент) фаз на разных участках аппаратов и установок;
- скорость относительного движения фаз;
- удельное наполнение стружкой диффузионного объема аппаратов;
- распределение температуры по длине аппаратов и равномерность температурных полей по сечению потоков сокостружечной смеси;
- интенсивность массоотдачи по длине аппаратов.

Одним из показателей качества гидродинамических условий для осуществления эффективного тепломассообмена в диффузионных аппаратах разных конструкций является коэффициент массоотдачи. Он зависит от ряда перечисленных технологических факторов и кон-

структивных особенностей аппаратов.

Существенные различия конструктивных элементов транспортных систем, обеспечивающих встречное перемещение твердой и жидкой фаз в аппаратах разных конструкций, оказывают разное влияние перечисленных факторов на эффективность процесса. Рядом исследований и практикой эксплуатации установлено, что лучшие технико-экономические показатели работы диффузионных установок достигаются при нарезании свеклы на стружку квадратного, ромбовидного или треугольного профиля [7], длина 100 г которой для ротационных и колонных установок — 12–14 м соответственно, для аппаратов наклонного типа — 8–12 м с браком не более 3% [10].

Увеличение эквивалентного радиуса стружинок, рассчитанного по уравнению  $R_{\text{экв}} = \frac{F}{\Pi}$  (где  $F$  — площадь сечения и  $\Pi$  — его периметр), всегда увеличивает интенсивность массоотдачи. В диффузионных аппаратах наклонного типа и установках колонного типа при увеличении  $R_{\text{экв}}$  в интервале  $1,45 \cdot 10^{-3}$ – $1,9 \cdot 10^{-3}$  м, коэффициент массоотдачи увеличивается от  $18 \cdot 10^{-7}$  до  $60 \cdot 10^{-7}$  м/с.

В ротационных диффузионных установках изменение  $R_{\text{экв}}$  в интервале  $1,0 \cdot 10^{-3}$ – $1,9 \cdot 10^{-3}$  м, увеличивает  $\beta$  от  $10 \cdot 10^{-7}$  до  $70 \cdot 10^{-7}$  м/с.

Однако, улучшая интенсивность массоотдачи только увеличени-

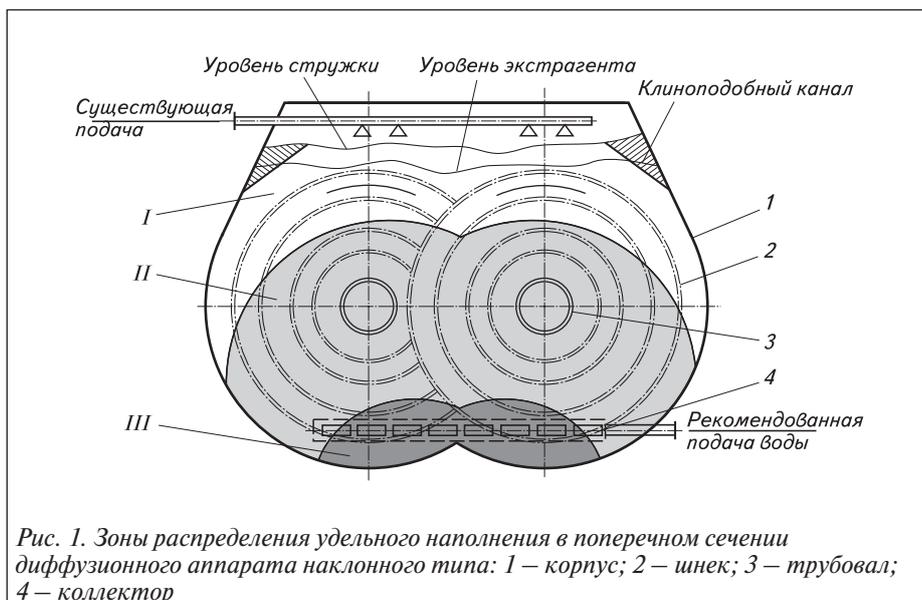


Рис. 1. Зоны распределения удельного наполнения в поперечном сечении диффузионного аппарата наклонного типа: 1 – корпус; 2 – шнек; 3 – трубовал; 4 – коллектор

ем толщины стружки указанных границ, можно получить отрицательный результат — увеличение потерь сахарозы в жоме. Поэтому следует учитывать влияние и других факторов: соотношения фаз, равномерности прогрева смеси и др.

Интенсивность массоотдачи с увеличением соотношения фаз может увеличиваться (в ротационных аппаратах) и уменьшаться (в аппаратах наклонного типа). Это объясняется тем, что средняя величина удельного наполнения камер ротационного аппарата стружкой равна 400 кг/м<sup>3</sup> и при увеличении количества жидкой фазы (увеличения откачки) стружка переходит в почти плавающее состояние, хорошо омываясь экстрагентом при незначительной скорости его движения относительно поверхности стружинок.

В двухшнековых аппаратах наклонного типа величина удельного наполнения несильно изменяется по их длине и в среднем составляет 600 кг/м<sup>3</sup>. В корпусах таких аппаратов, при вращении шнеков в противоположных направлениях, создаются каналы между боковыми стенками аппарата и движущейся поверхностью стружки (рис. 1). При увеличении подачи экстрагента его избыточ-

ное количество движется по этим каналам вниз, почти не контактируя с внутренними шарами стружки. Это не только не способствует улучшению условий экстрагирования сахарозы, но и, достигнув головной части аппарата, уменьшает количество сухих веществ в диффузионном соке, отводимом на производство.

Этим объясняется незначительное влияние увеличения соотношения массы жидкой фазы к стружке (откачки) на эффективность извлечения сахарозы в аппаратах наклонного типа. Устра-

нение поверхностного бокового перелива экстрагента и уменьшение зон увеличенного удельного наполнения стружкой (зоны II и III), возникающего в результате встречного движения витков шнека в нижней половине поперечного сечения (см. рис. 1), приведет к выравниванию величины удельного наполнения, изменяющегося в зонах I–III от 570 до 620 кг/м<sup>3</sup>, обеспечит равномерное наполнение стружкой всего объема аппарата и будет способствовать получению, при минимальных затратах питательной воды, диффузионного сока с высоким содержанием сухих веществ.

Одним из способов достижения таких условий может быть изменение места ввода питательной воды. Ее подача через поперечный коллектор (см. рис. 1 и рис. 2), установленный ниже уровня трубовала, обеспечит равномерное распределение экстрагента по площади поперечного сечения, уменьшит прессующие усилия от встречных перемещений стружки и будет способствовать увеличению скорости относительного перемещения стружинок и экстрагента.

Влияние скорости жидкой фазы, размера стружинок и соотношения фаз на интенсивность массо-

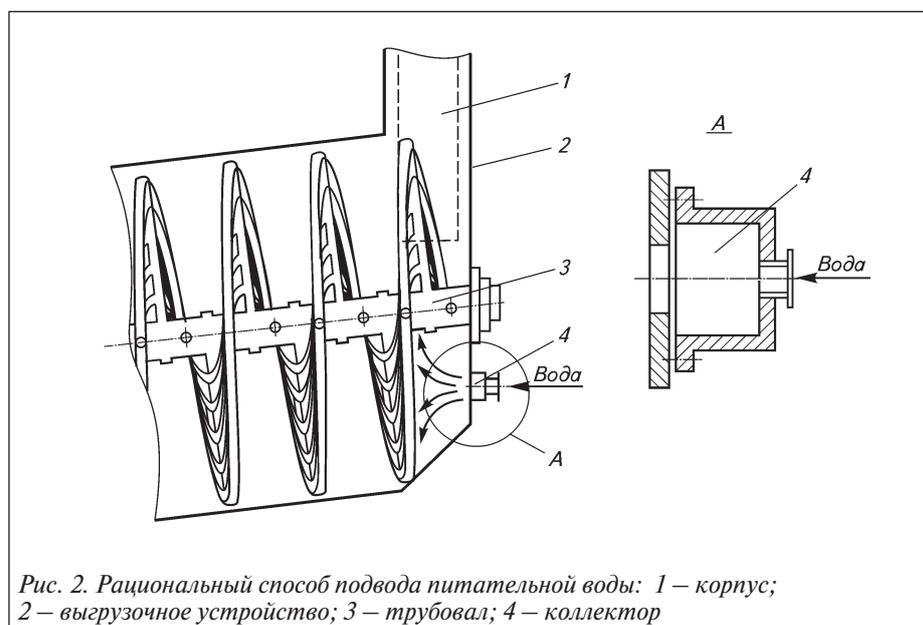


Рис. 2. Рациональный способ подвода питательной воды: 1 – корпус; 2 – выгрузочное устройство; 3 – трубовал; 4 – коллектор

отдачи изучались в лабораторных и промышленных условиях [1, 2]. Полученные результаты таких исследований [7] обобщены критериальным уравнением:

$$Nu' = 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,38} \cdot Pr^{0,33} \quad (1)$$

где  $Nu'$  – диффузионный критерий Нуссельта;

$Re$  – критерий Рейнольдса;

$Pr$  – диффузионный критерий Прандтля.

Зависимость (1) может быть использована для определения коэффициента массоотдачи  $\beta$  от слоя стружки к экстрагенту при колебании температуры в пределах 50–83°C, удельном наполнении 600–750 кг/м<sup>3</sup>, скорости движения экстрагента – 0,018–0,094 м/с и приведенном радиусе стружки  $R = (1,35–1,85) \cdot 10^{-3}$  м, что соответствует длине 100 г стружки 9–12 м.

На рис. 3 показано влияние скорости потока экстрагента на интенсивность массоотдачи. Распространенные в диффузионных аппаратах скорости омывания стружинок ( $w = 2–3$  мм/с) практически не оказывают влияния на поведение  $\beta$ . С возрастанием  $w$  до 4–8 мм/с величина  $\beta$  увеличивается в 10 раз. Однако достижение таких значений  $w$  в диффузионных

аппаратах существующих конструкций невозможно.

Анализ распределения локальных значений коэффициента массоотдачи по длине наклонного экстрактора DDC-30 показывает, что при средней производительности аппарата 120 т/ч (величина удельного наполнения составила 595 кг/м<sup>3</sup>) интенсивность массоотдачи по длине аппарата четко распределяется по 3 зонам. В головной части, на участке, прилегающем к ситу, значение коэффициента массоотдачи –  $(15–20) \cdot 10^{-7}$  м/с, что объясняется влиянием перемешивающего действия ситоочистителей. Затем по ходу стружки в средней части зоны  $\beta$  уменьшается до  $(8–12) \cdot 10^{-7}$  м/с из-за недостаточного прогрева сокоотражечной смеси и достигает максимальных значений в средней зоне и на всех переходных участках между секциями. Эти участки расположены в местах разрывов витков транспортирующих шнеков, где их концевые части выполнены в форме лопастей, перемещающих стружку через пространства, в которых размещены опорные балки, играющие роль контрлопастей.

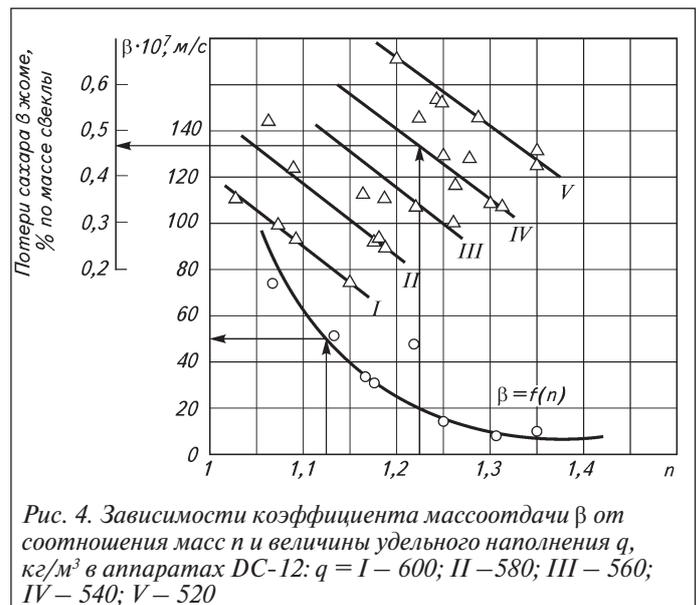
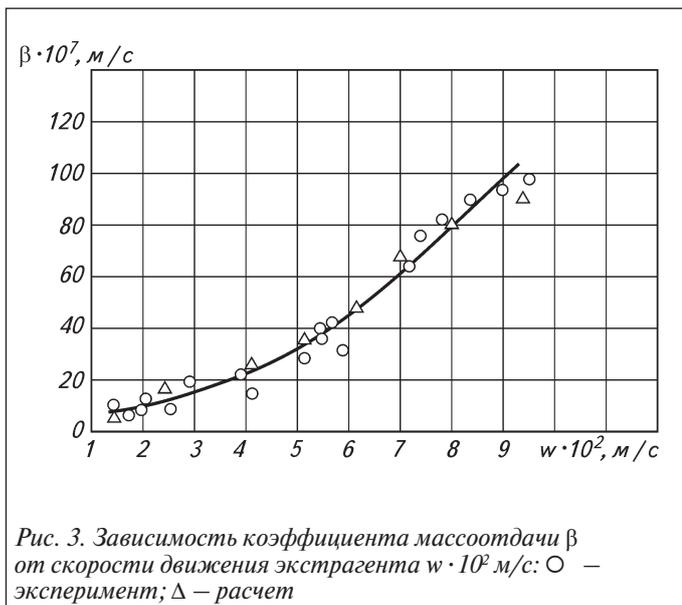
Интенсивное перемешивание и равномерный прогрев этих зон обеспечивают хорошие условия для массоотдачи. Работа аппара-

тов такого типа (DC-12) на тонкой стружке (10–12 м/100 г), которая сохраняет свою механическую прочность и не дробится под воздействием транспортирующих шнеков, позволяет за счет уменьшения продольного перемешивания интенсифицировать экстрагирование по всей длине аппарата и уменьшить потери сахара в жоме на 0,11% к массе свеклы.

Зависимость коэффициента массоотдачи от величины соотношения фаз в наклонных диффузионных аппаратах показана на рис. 4. Прямые по данным опытов отражают зависимость потерь сахара от величины соотношения фаз ( $\beta = f(n)$ ) и удельного наполнения ( $\beta = f(q)$ ).

Причины ухудшения массообмена при увеличении соотношения масс в двухшнековых наклонных экстракторах связаны с образованием клиновидных каналов у стенок и свободным перетоком экстрагента из хвостовых зон аппарата в головную часть.

Извлечение сахарозы из свекловичной стружки в колонных диффузионных установках происходит в еще более сложных гидродинамических условиях. Предварительная тепловая обработка стружки в ошпаривателях типа РЗ-ПОД, ПНА-3 ведется при разных



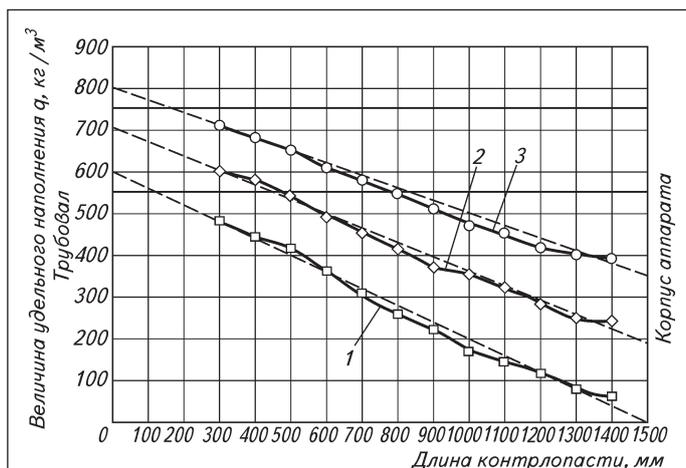


Рис. 5. Зависимость распределения величины удельного наполнения по радиусу аппарата  $q = f(R)$ : 1 — 4 ряд контролопастей; 2 — 8 ряд контролопастей; 3 — 12 ряд контролопастей

режимах движения фаз «стружка—экстрагент»: противоточном — в головных их частях, смешанном — в средних и прямоточном — в хвостовых и на участках подачи сокостружечной смеси насосом в колонну.

Соотношение фаз изменяется по длине ошпаривателя, колеблется в головной части в границах 1,1–1,25 и в хвостовой — 2,5–3,0. Сложную гидродинамическую обстановку в ошпаривателях, вызванную изменением направлений движения твердой и жидкой фаз, их соотношения, ускоряет измельчение стружки, которое, по данным [4], характеризуется падением величины шведского фактора от 10–12 до 2–4.

При хороших условиях тепловой обработки и нахождении стружки в ошпаривателях на протяжении 10–12 мин из нее в экстрагент переходит до 12–14% сахарозы, оставшаяся часть извлекается в колонне и при форсированных режимах работы — в колонне и на прессах.

Подача в нижнюю часть колонны 350–400% к массе свеклы сокостружечной смеси и ее перемешивание со 100% к массе свеклы экстрагента, создает соотношение фаз 1:(4,5–5,0). Среднее удельное наполнение стружкой объема ко-

лонны высотой 1,0–1,5 м от фильтрующих составляет 350–400 кг/м³. Стружка движется по спирали под действием лопастей и контролопастей и переходит от почти свободного плавания по высоте колонны, составляя 550–750 кг/м³ в средней части и может достигать 850–900 кг/м³ в зоне выгрузки жома. На величину наполнения разных по высоте зон колонны влияет стабильность частоты вращения трубовала и ритмичность поступления сокостружечной смеси.

Исследования показали, что величина удельного наполнения по высоте колонны, составляет 550–750 кг/м³ в средней части и может достигать 850–900 кг/м³ в зоне выгрузки жома. На величину наполнения разных по высоте зон колонны влияет стабильность частоты вращения трубовала и ритмичность поступления сокостружечной смеси.

Исследования показали, что величина удельного наполнения

распределяется неравномерно не только по высоте колонны, но и по ее радиусу [9]. На рис. 5 изображена функциональная зависимость  $q = f(R)$  в зонах 4, 8 и 12 ряда контролопастей. Во всех зонах сохраняется одинаковый характер извлечения удельного наполнения по радиусу колонны от трубовала до ее корпуса. Его отличие состоит только в величине наполнения, характерной для данной высоты размещения контролопастей.

На рис. 6 с экспериментальными значениями приведены величины удельного наполнения, полученные расчетным путем.

Наибольшей величина удельного наполнения оказывается возле трубовала колонны, а наименьшей — у корпуса. Такая ситуация объясняется разноудаленностью участков лопастей от центра трубовала, а значит — разностью линейных скоростей участков движущихся лопастей транспортной системы. Участки лопасти, находящиеся возле трубовала, имеют меньший радиус, длину окружности и, соответственно, меньшую линейную скорость, чем удален-

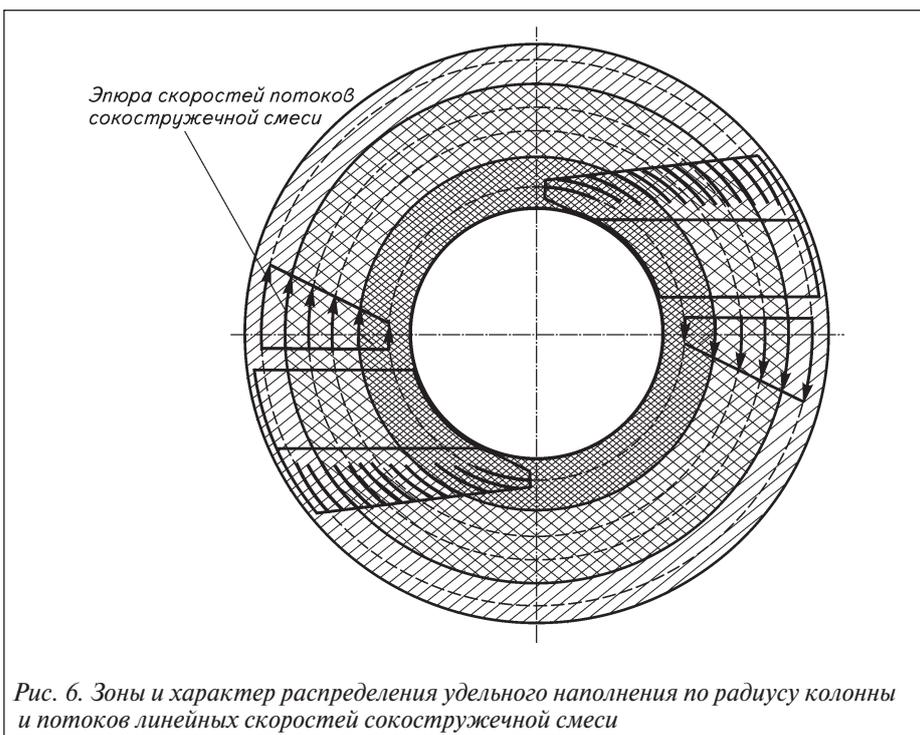


Рис. 6. Зоны и характер распределения удельного наполнения по радиусу колонны и потоков линейных скоростей сокостружечной смеси

ные участки корпуса аппарата.

Линейное увеличение скорости движения элементов системы от центра к периферии при одинаковом угле наклона лопастей и контролопастей ведет к образованию 3 условных концентрационных зон с разной величиной их удельного наполнения. Полученные с помощью специального пробоотборника значения величин удельного наполнения показаны на рис. 6. Разная плотность штриховки зон обозначает величину наполнения, кг/м<sup>3</sup>: максимальную у трубовала – 400–850, среднюю – 200–700 и периферийную – 100–450 кг/м<sup>3</sup>.

Послойные процессы перемешивания и перемещения стружки вверх по высоте колонны, осуществляемые с помощью транспортной системы, колебания величины удельного наполнения стружкой объема колонны от 100–150 кг/м<sup>3</sup> в нижней части колонны до 800–900 кг/м<sup>3</sup> в верхней образуют зоны со сменным количеством экстрагента, создают сложные гидродинамические условия, зачастую связанные с трудностями функционирования циркуляционного контура.

Экстрагирование сахарозы в распространенных типах промышленных диффузионных аппаратов непрерывного действия (колонных, ротационных и наклонного типа) в основном осуществляются в противоточном режиме. Эффективность их работы зависит от гидродинамических условий осуществления экстрагирования, определяемых конструкцией аппаратов, режимом их экстракции и частично характеризующихся величиной коэффициента массоотдачи. Приведенные для разных условий экстрагирования зависимости коэффициента массоотдачи от разных факторов: качественных показателей стружки (длина 100 г стружки, шведский фактор, форма поперечного сечения), величины удельного наполнения, температурных характеристик процесса, условий их противоточного пере-

мещения позволяют выбирать рациональные границы выбора этих показателей.

От равномерности распределения удельного наполнения по объему аппарата в значительной мере зависит коэффициент массоотдачи и эффективность работы установок в целом. Величина удельного наполнения, являясь одним из главных факторов, определяющих гидродинамические условия экстрагирования, влияет на общую площадь контакта стружки и экстрагента, скорость передвижения сока в межстружечном пространстве и величину нагрузки, действующей на элементы транспортных систем и привод. Неравномерность распределения величины удельного наполнения по радиусу колонн при одинаковом угле наклона рабочих поверхностей лопастей свидетельствует о необходимости дальнейших исследований и поиска их рациональных профилей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Верхола А.П.* Исследование основных факторов, влияющих на процесс массоотдачи при экстракции сахара из свеклы : автореф. дис. канд. техн. наук. – Киев, 1966. – 25 с.
2. *Дронов С.Ф.* Динамическая теория извлечения сахара из свеклы диффузионным методом. – М. : Пищепромиздат, 1952. – 101 с.
3. *Зоткина Л.В.* Влияние гидродинамических условий на параме-

тры процесса экстракции в диффузионных аппаратах непрерывного действия : автореф. дис. канд. техн. наук. – Киев, 1981. – 21 с.

4. *Коваль Е.Т.* Непрерывнодействующая колонная диффузионная установка КДА-25-59 / Е.Т. Коваль, В.Г. Ярмилко, В.Я. Вайлов // Сахарная промышленность. – 1965. – №4. – С. 16–21.

5. *Лысянский В.М.* Зависимости коэффициента диффузии сахара в свекле от температуры и концентрации // Сахарная промышленность. – 1964. – №5. – С. 8–15.

6. *Лысянский В.М.* Процесс экстракции сахара из свеклы. Теория и расчет. – М. : Пищевая промышленность, 1973. – 221 с.

7. *Пушанко Н.Н.* Совершенствование процесса экстрагирования и его аппаратного оформления в свеклосахарном производстве : дис. д-ра техн. наук. – Киев, 1983. – 427 с.

8. *Технологическое* оборудование сахарных заводов / С.М. Гребенюк, Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, К.И. Виноградов. – М. : КолосС, 2007. – 520 с.

9. *Пушанко М.М.* Розподіл питомого навантаження стружки в об'ємі колонного дифузійного апарата / М.М. Пушанко, А.М. Парахоня // Цукор України. – 2012. – №9. – С. 20–24.

10. *Технологічний процес виробництва цукру з цукрових буряків. Правила усталеної практики / Штангеев В. та ін.* – Киев : Цукор України, 2007. – 419 с.

**Аннотация.** Рассмотрены особенности гидродинамических условий экстрагирования сахарозы из свекловичной стружки в объеме наиболее распространенных диффузионных установок. Установлены основные параметры, влияющие на тепломассообмен. Приведены методы решения проблемы равномерного распределения величины удельного наполнения по объему аппарата.

**Ключевые слова:** тепломассообмен, экстрагирование, величина удельного наполнения.

**Summary.** The features of the hydrodynamic conditions of extraction of sucrose from beet chips in the most common diffusion installations are discussed. The basic parameters affecting the heat and mass transfer are set. The solving problem methods of uniform distribution of specific filling value by volume of the unit are given.

**Keywords:** heat and mass transfer, extraction, value of specific filling.