

УДК 664.85.03: 641.524.6

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ СУШЕНЫХ ЯБЛОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА С ВИБРАЦИОННОЙ НАСАДКОЙ

**Иванов П.П., Сорокопуд А.Ф., Иванова Л.А., Афанасьева М.М.**

*ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)»*

*Кемерово, e-mail: mapp@kemtipp.ru, ipp@yandex.ru*

Показано влияние амплитуды и частоты колебаний вибрационной насадки на кинетику процесса. Установлено, что связь между этими параметрами носит нелинейный характер, это объясняется многостадийностью процесса, в частности наличием стадии набухания сушеного сырья. Экспериментально доказано, что на скорость и энергоёмкость процесса амплитуда и частота колебаний оказывают совместное влияние. При этом каждому значению амплитуды соответствует предельное значение частоты колебаний вибрационной насадки, превышение которой не сопровождается адекватным ростом скорости массообмена, но увеличивает затраты энергии на ее работу. Получена система регрессионных уравнений, позволяющая определить оптимальное сочетание частоты и амплитуды колебаний вибрационной насадки при экстрагировании сушеных яблок в рассматриваемом аппарате. Уравнения справедливы в диапазонах  $n \in [6,7; 16,7]$  Гц;  $A \in [6; 12]$  мм и могут быть использованы для проведения инженерных расчетов аппаратов с вибрационной насадкой, используемых для экстрагирования сушеного плодово-ягодного сырья в пищевой, химико-фармацевтической и смежных отраслях промышленности.

**Ключевые слова:** аппарат с вибрационной насадкой, экстрагирование, экстракт, сушеные яблоки, частота колебаний, амплитуда колебаний

## THE ENHANCEMENT OF DRIED APPLE EXTRACTION USING AN APPARATUS WITH AN OSCILLATING PLATE

**Ivanov P.P., Sorokopud A.F., Ivanova L.A., Afanaseva M.M.**

*Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University),*

*Kemerovo, e-mail: mapp@kemtipp.ru, ipp@yandex.ru*

The influence of the amplitude and frequency of the plate oscillations on the kinetics of the process has been shown. It has been found that the relationship between those parameters has nonlinear character, which can be explained by multiple stages of the process, particularly by the swelling of dried raw material. The amplitude (A) and frequency (n) of oscillations have been proved to have joined influence on the rate and energy intensity of the process. Herewith, each value of plate oscillation amplitude has the limiting frequency, exceeding of which is not accompanied by the adequate increase in mass-transfer rate but leads to the rise of energy expenditure. The system of regression equations, which enables to define the optimum combination of the amplitude and frequency of the plate oscillations for dried apple extraction, has been worked out. The equations are true over the ranges of  $n \in [6,7; 16,7]$  Hz;  $A \in [6; 12]$  mm and can be used for engineering calculations of apparatuses with oscillating plates, designed for dried fruit extraction in food, chemical and pharmaceutical industries as well as in allied industries.

**Keywords:** apparatus with an oscillating plate, extraction, extract, dried apples, frequency of oscillations, amplitude of oscillations

В сушеном плодово-ягодном сырье целевой компонент, на извлечение которого направлен процесс экстрагирования, как правило, находится в твердом виде, распределяясь внутри клеток [2]. Вода, проникая в поры твердого тела, растворяет водорастворимые вещества внутри клеток, обеспечивая их массоперенос к поверхности раздела фаз. Этот процесс сопровождается изменением линейных размеров, интенсивным набуханием и деформацией нерастворимых компонентов сырья, формирующих скелет растительной ткани. Указанные изменения тормозят извлечение водорастворимых веществ, увеличивая внутреннее диффузионное сопротивление. Исходя из общих положений теории массообмена, для снижения диффузионного сопротивления необходимо обеспечивать уменьшение размера частиц твердой фазы и повышение температуры среды. Однако указанные

способы имеют ряд ограничений, которые определяются структурно-механическими и физико-химическими свойствами сырья, а также особенностями используемой технологической схемы.

Перспективным методом интенсификации процесса экстрагирования растительного сырья является наложение на обрабатываемую систему внешнего силового воздействия. В частности, использование поля низкочастотных механических колебаний, создаваемого перфорированной вибрационной насадкой, расположенной в рабочей зоне аппарата [1, 3, 5]. Этот метод обеспечивает создание гидродинамического режима, характеризующегося знакопеременным движением обрабатываемой среды, при котором обеспечивается высокая скорость образования коротких кавитационных волн и вихрей при прохождении жидкости через отверстия перфорации насадки [4, 5].

Данный гидродинамический режим сопровождается ударными воздействиями на обрабатываемую систему в фазе сжатия и растягивающими усилиями в фазе растяжения, что формирует разнообразные воздействия на систему «твердое тело – жидкость», которые можно свести к следующим эффектам: ускорение процессов смачивания и проникновения жидкости в поры твердой фазы; диспергирование твердой фазы; увеличение скорости обновления поверхности контакта фаз; ускорение процессов массоотдачи и массопереноса за счет уменьшения толщины пограничного слоя; локальное повышение температуры в результате поглощения системой механической энергии при высокоскоростном прохождении жидкости через отверстия вибрационной насадки [1, 4].

**Цель исследования** – интенсификация процесса экстрагирования сушеных яблок в аппарате с вибрационной насадкой на основе анализа кинетики процесса и энергозатрат.

### Материалы и методы исследования

Материалом исследования являлись сушеные яблоки сорта Ренет Симиренко урожая 2013 г. В качестве экстрагента использовалась водопроводная питьевая вода, соответствующая требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01. Определение массовой доли концентрации сухих водорастворимых веществ проводили на рефрактометре ИРФ-454Б2М.

Для исследования кинетики экстрагирования сушеных яблок водой использовался лабораторный емкостной экстрактор с вибрационной насадкой (рис. 1). Аппарат представляет собой вертикальный цилиндрический теплоизолированный корпус 1 диаметром 145 мм и объемом рабочей камеры 3 дм<sup>3</sup>. В корпусе соосно установлен шток 2, совершающий возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости. На штоке закреплена вибрационная насадка 3, выполненная в форме перфорированного отверстия диаметром 3 мм диска, диаметром 141 мм, с долей живого сечения 16,5%. По периметру насадки установлена отбортовка высотой 13 мм, направленная к дну аппарата. Отбортовка обеспечивала формирование направленных струй обрабатываемой суспензии, а также уплотнение зазора между вибрационной насадкой и стенкой аппарата. Расстояние от дна аппарата до насадки составляло 80 мм. Возвратно-поступательные движения штоку сообщаются от электродвигателя постоянного тока ПЛ-072, при помощи кривошипно-шатунного механизма 4, с изменяемой длиной кривошипа. Двигатель включен в питающую сеть через лабораторный автотрансформатор, обеспечивающий реостатное регулирование частоты вращения якоря.

Экспериментальные исследования проводились следующим образом: в предварительно прогретый до температуры 50 °С аппарат засыпалась навеска сушеных яблок, измельченных на волчке с диаметром отверстий выходной решетки 8 мм, массой 250 г. Заливалась вода с температурой 50 °С в количестве 2,5 кг, что соответствует гидромодулю 1:10, после чего включался привод насадки и начинался отсчет времени. В течение первых пяти минут через

каждые 30 секунд, а далее через каждые 60 секунд, отбирались пробы жидкой фазы, в которых определялось содержание сухих растворимых веществ. Эксперимент продолжали до достижения максимальной концентрации сухих растворимых веществ в пробе, которая при заданном гидромодуле составила 6,7%. Частота колебаний насадки соответствовала частоте вращения вала двигателя и измерялась тахометром ТЧ-10Р, классом точности 1. Измерение мощности, потребляемой электродвигателем, проводили ваттметром Д 5016 с классом точности 0,2. Измерение всех контролируемых параметров выполнялось не менее чем в 3-кратной повторности, отклонения результатов составляли ±0,05...0,3%.

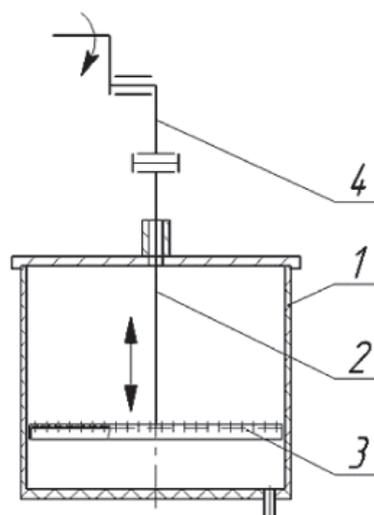


Рис. 1. Схема экстрактора с вибрационной насадкой:  
1 – корпус; 2 – шток; 3 – перфорированная насадка; 4 – кривошипно-шатунный механизм

Расчет удельных затрат энергии на всех режимах работы произведен по формуле

$$Q_{уд} = \frac{N_{cp} \cdot t}{m \cdot 60}, \quad (1)$$

где  $Q_{уд}$  – удельные затраты энергии на килограмм обрабатываемого продукта, Дж/кг;  $t$  – продолжительность экстрагирования до выхода на максимальную концентрацию растворимых сухих веществ, мин;  $N_{cp}$  – средне-интегральное значение мощности для рассматриваемого режима работы аппарата за время  $t$ , Вт;  $m$  – масса одновременно загруженного в аппарат продукта, кг.

Обработка и анализ экспериментальных данных выполнены с использованием программных пакетов MS Excel 2007 и MathCAD. Адекватность полученных регрессионных уравнений оценивалась по величине коэффициента детерминации  $R^2$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

Зависимость выхода растворимых сухих веществ из сушеных яблок в аппарате с вибрационной насадкой (рис. 2) имеет нелинейный характер, что говорит о нестационарных условиях протекания процесса.

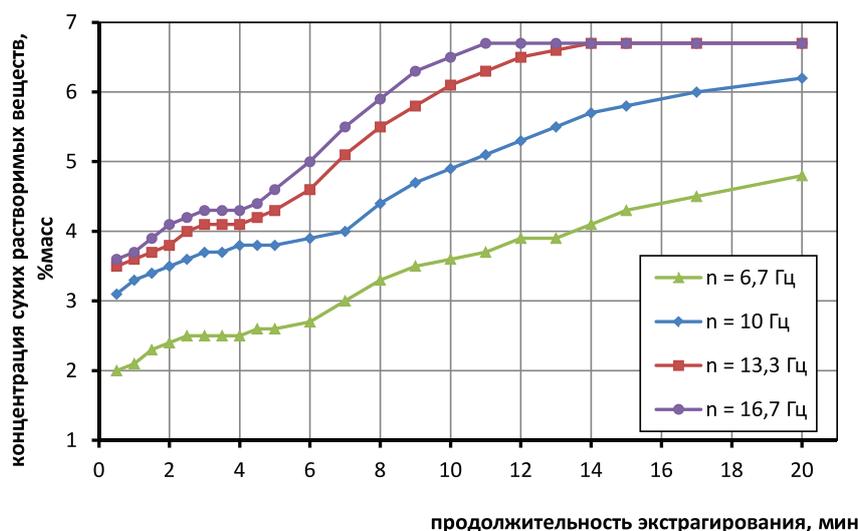


Рис. 2. Кинетические кривые извлечения растворимых сухих веществ из сушеных яблок в зависимости от частоты колебаний вибрационной насадки

На рассматриваемых кривых извлечения можно выделить три стадии:

1) смыв целевого компонента с поверхности твердых частиц – наблюдается значительное повышение концентрации извлекаемых веществ;

2) набухание твердых частиц – наблюдается значительное замедление выхода растворимых сухих веществ в жидкую фазу. Это объясняется увеличением геометрических размеров твердых частиц, которое сопровождается увеличением длины капилляров, а также протеканием процессов десорбции, наблюдаемых в мертвой клетке после проникновения в нее экстрагента;

3) извлечение целевого компонента из внутреннего объема твердых частиц – наблюдается значительное ускорение массопереноса от твердой фазы к жидкой, при этом на скорость процесса значительное влияние оказывает толщина пограничного слоя, которая определяется степенью турбулизации обрабатываемой среды.

Скорость протекания этих стадий, при постоянной температуре процесса, во многом будет зависеть от величины подведенного внешнего силового воздействия, формирующего гидродинамический режим в рабочем объеме аппарата.

Исследование гидродинамического режима необходимо начинать с исследования влияния параметров колебательного движения вибрационной насадки, а именно частоты и амплитуды колебаний. Анализ литературных данных не позволил найти обобщенный параметр, учитывающий со-

вместное влияние этих факторов на процесс экстрагирования, поэтому нами проведены отдельные исследования влияния амплитуды и частоты колебаний на кинетику процесса, а также дана оценка их совместного воздействия. На первом этапе определяли влияние частоты колебаний вибрационной насадки на процесс экстрагирования, в данном случае эксперимент проводился при амплитуде 6 мм.

Анализ кривых извлечения (рис. 2) показывает прямую зависимость между частотой колебаний насадки и скоростью процесса. Это объясняется увеличением турбулентности потоков внутри рабочей зоны аппарата, что ведет к уменьшению толщины пограничного слоя, однако при работе на частотах выше 13,3 Гц не наблюдается значительного повышения скорости извлечения растворимых сухих веществ, в то же время затраты энергии возрастают. Это является следствием достижения в аппарате гидродинамических условий, при которых время релаксации струи будет меньше периода колебаний вибрационной насадки. В данном случае под временем релаксации струи понимается длительность изменения направления струи в поле низкочастотных механических колебаний, создаваемых вибрационной насадкой. Кривые извлечения, полученные при амплитудах колебаний насадки 9 и 12 мм, носят аналогичный характер, при этом продолжительность выхода на максимальную концентрацию уменьшается на 15–70%, в то же время эти режимы характеризуются более высокими затратами энергии (таблица).

Удельные затраты энергии на экстрагирование сушеных яблок в аппарате с вибрационной насадкой в зависимости от частоты и амплитуды колебаний насадки

n, Гц	Удельные затраты энергии, Дж/кг		
	A = 6 мм	A = 9 мм	A = 12 мм
6,7	4,727	9,272	10,393
8,3	4,636	8,909	10,061
10	4,545	8,751	10,776
11,7	4,484	9,818	12,8
13,3	4,497	10,733	14,303
15	5,236	11,818	16,691
16,7	6,333	13,636	18,182

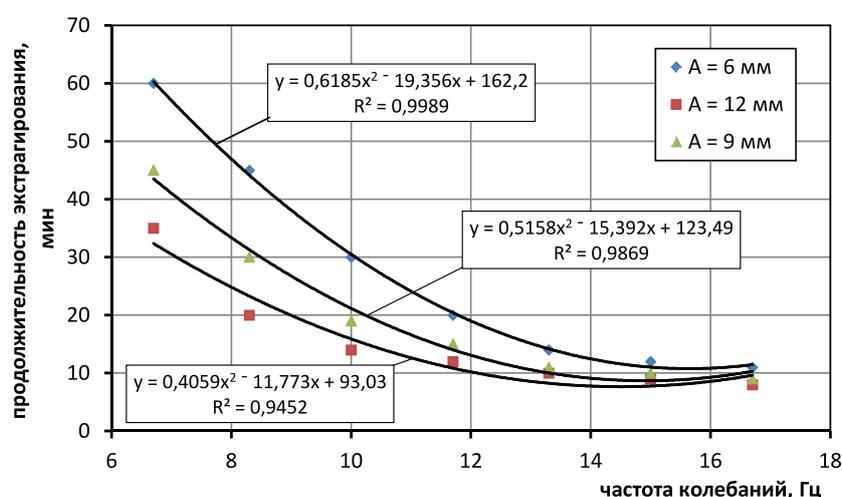


Рис. 3. Зависимость продолжительности экстрагирования от частоты колебаний вибрационной насадки

Функциональная связь между продолжительностью выхода системы на максимальную концентрацию растворимых сухих веществ в зависимости от частоты колебаний вибрационной насадки показана на рис. 3. Полученные экспериментальные данные адекватно описываются полиномиальными зависимостями второго порядка, при этом экстремум каждой кривой находится внутри исследуемого диапазона, что позволяет произвести поиск оптимального значения частоты колебаний вибрационной насадки для каждого значения амплитуды.

Анализ кривых на рис. 3 показывает, что увеличение количества подводимой внешней энергии к обрабатываемой системе ведет к снижению продолжительности процесса экстрагирования, в то же время это сопровождается увеличением энергоемкости процесса. При этом связь между этими показателями, в случае экстрагирования су-

шеных яблок, носит нелинейный характер, это можно объяснить многостадийностью процесса и, в частности, наличием стадии набухания сушеного сырья, скорость которого определяется скоростью внутримолекулярной диффузии и в меньшей степени зависит от величины подведенной внешней энергии.

Для учета совместного влияния частоты и амплитуды колебаний вибрационной насадки на степень извлечения сухих растворимых веществ и расхода энергии на работу вибрационной насадки построена поверхность отклика удельных затрат энергии от частоты и амплитуды колебаний вибрационной насадки (рис. 4, поверхность 1).

В результате многомерного регрессионного анализа удельных затрат энергии, как функции амплитуды и частоты колебаний вибрационной насадки получена зависимость

$$Q_{\text{уд}}(n, A) = 1,043 - 2,052 \cdot n + 2,576 \cdot A + 0,061 \cdot n^2 + 0,122 \cdot n \cdot A - 0,145 \cdot A^2, \quad R^2 = 92,6\%, \quad (2)$$

Уравнение (2) справедливо в диапазонах  $n \in [6,7; 16,7]$  Гц;  $A \in [6; 12]$  мм.

Анализ распределения удельных затрат энергии в зависимости от параметров вибрационного воздействия позволяет сделать вывод о том, что для каждого значения амплитуды колебаний вибрационной насадки существует предельная частота, при приближении к которой энергоёмкость процесса снижается за счет сокращения продолжительности процесса. Однако при превышении этой частоты общие затраты энергии повышаются, так как снижение продолжительности процесса сопровождается значительным повышением удельных затрат энергии, подводимой к приводу установки для достижения заданного режима колебаний вибрационной насадки. Так, например, для амплитуды 6 мм предельная частота составляет 11,7 Гц, для амплитуды 9 мм – 10 Гц, для амплитуды 12 мм – 8,3 Гц. Используя эти данные, найдем уравнение плоскости и построим ее (рис. 4, поверхность 2):

$$Q_{уд}(n, A) = 47,529 - 0,877 \cdot A - 3,187 \cdot n. \quad (3)$$

Уравнение (3) справедливо в диапазонах  $n \in [6,7; 16,7]$  Гц;  $A \in [6; 12]$  мм.

Линия пересечения поверхностей показывает рекомендуемую комбинацию амплитуды и частоты колебаний вибрационной насадки, обеспечивающую высокую скорость проведения процесса экстрагирования сушеных яблок при минимальных удельных затратах энергии на процесс.

При этом уравнение кривой можно представить в виде

$$\begin{cases} Q_{уд}(n, A) = 1,043 - 2,052 \cdot n + 2,576 \cdot A + 0,061 \cdot n^2 + 0,122 \cdot n \cdot A - 0,145 \cdot A^2; \\ Q_{уд}(n, A) = 47,529 - 0,877 \cdot A - 3,187 \cdot n. \end{cases} \quad (4)$$

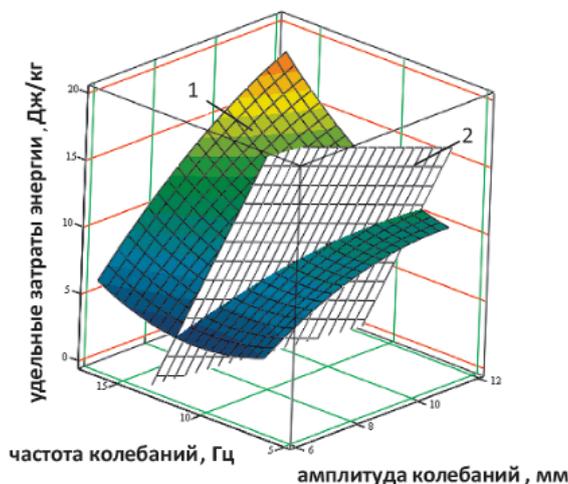


Рис. 4. Зависимость удельных затрат энергии от частоты и амплитуды колебаний вибрационной насадки

Для проверки адекватности полученных математических зависимостей была проведена дополнительная серия экспериментов при амплитуде колебаний насадки  $A = 8$  мм. Отклонение полученных экспериментальных данных от значений, вычисленных по выражению (4), не превышало 10%, что говорит об адекватности полученного выражения. При этом предельная частота колебаний насадки составила 10 Гц, а значение, вычисленное по выражению (4) 9,8 Гц, т.е. относительная ошибка вычислений, не превышает 2%.

Таким образом, полученная экспериментально-статистическая модель позволяет с достаточной для практических расчетов точностью определять рациональную комбинацию амплитуды и частоты колебаний вибрационной насадки при наименьших энергозатратах на процесс и может использоваться при расчете аппаратов с вибрационной насадкой, используемых для экстрагирования сушеного плодово-ягодного сырья в пищевой, химико-фармацевтической и смежных отраслях промышленности.

#### Выводы

Анализ полученных экспериментальных данных доказывает, что использование поля низкочастотных механических колебаний как метода интенсификации процесса экстрагирования растворов сухих веществ из сушеных яблок целесообразно. Полученные кривые извлечения свидетельствуют о нестационарной кинетике процесса и наличии нелинейной связи между параметрами колебательного движения

вибрационной насадки и скоростью извлечения сухих растворимых веществ. При этом для каждого значения амплитуды колебаний вибрационной насадки существует предельное значение частоты этих колебаний, превышение которой не сопровождается адекватным ростом скорости массообмена, но увеличивает расход энергии на работу вибрационной насадки.

#### Список литературы

1. Городецкий И.Я., Васин А.А., Олевский В.М., Лупанов П.А. Вибрационные массообменные аппараты / под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия, 1980. – 192 с.
2. Зайцева И.А. 2012. Сухофрукты от всех болезней. – М.: Мир книги Ритейл, 2012. – 255 с.
3. Мищенко Е.В. Экстракция в вибрационном поле // Вопросы вибрационной технологии: межвузовский сборник научных статей. Дон. гос. техн. ун-т. – Ростов н/Д: Дон. гос. техн. ун-т. 2006. – С. 153–155.
4. Сорокопуд А.Ф., Иванов, П.П. 2014. Использование системного анализа при исследовании аппаратов с вибрационной насадкой // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2014. – № 1. – URL: <http://processes.open-mechanics.com/articles/938.pdf> (дата обращения 20.03.2015).
5. Nagendra K., Yang B., Zhao M., Wang B.S. and Chen F. Effects of high-pressure treatment on the extraction yield, phenolic content and antioxidant activity of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) fruit pericarp // International Journal of Food Science and Technology. – 2009. – № 44. – P. 960–966.

#### References

1. Gorodeckij I.Ja., Vasin A.A., Olevskij V.M., Lupanov P.A. Vibracionnye massoobmennye apparaty [Oscillating mass transfer apparatuses] / Pod red. V.M. Olevskogo. M.: Himija, 1980. 192 p.
2. Zajceva I.A. 2012. Suhofrukty ot vseh boleznej [Disease-fighting dried fruit]. M.: Mir knigi Ritejl, 2012. 255 p.
3. Mishhenko E.V. Jekstrakcija v vibracionnom pole. Voprosy vibracionnoj tehnologii: Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh statej. Don. gos. tehn. un-t. Rostov n/D: Don. gos. tehn. un-t. 2006, pp. 153–155.
4. Sorokopud A.F., Ivanov P.P. 2014. Ispolzovanie sistemnogo analiza pri is-sledovanii apparatov s vibracionnoj nasadkoj // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevych proizvodstv» 2014, no. 1, available at: <http://processes.open-mechanics.com/articles/938.pdf> (20.03.2015)
5. Nagendra K., Yang B., Zhao M., Wang B.S. and Chen F. Effects of high-pressure treatment on the extraction yield, phenolic content and antioxidant activity of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) fruit pericarp. International Journal of Food Science and Technology. 2009. 44, 960–966.

#### Рецензенты:

Петрик П.Т., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Энергоресурсосберегающие процессы в химической и нефтегазовой технологиях», ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово;

Бородулин Д.М., д.т.н., зав. кафедрой «Технологическое проектирование пищевых производств», ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», г. Кемерово.

Работа поступила в редакцию 10.04.2015.