

УДК 621.929.7:641.524.6

**А.Ф. Сорокопуд, А.Е. Ворыханов, П.П. Иванов****ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВИБРОЭКСТРАКТОРА  
ПРИ РАСТВОРЕНИИ САХАРНОГО СИРОПА**

Установлены параметры, оказывающие наибольшее влияние на эффективность работы экстрактора с вибрационной тарелкой в условиях растворения сахарного сиропа, и приведены границы их применения. Определены рациональные значения основных режимных характеристик и конструктивных параметров виброэкстрактора. Даны практические рекомендации по использованию виброэкстрактора в пищевой промышленности.

Виброэкстрактор, кинетика растворения, энергозатраты.

**Введение**

Постоянное увеличение объемов производства и ассортимента лекарственных средств, биологических добавок и продуктов питания на основе экстрактов из растительного сырья диктует необходимость разработки способов интенсификации процесса экстрагирования и создания аппаратов для их осуществления.

Традиционные способы экстрагирования растительного сырья в большинстве случаев не вполне эффективны, так как не обеспечивают достаточную полноту извлечения целевого компонента, характеризуются длительностью процесса и неэффективными затратами подведенной энергии.

С целью увеличения движущей силы процесса экстрагирования применяют различные методы интенсификации и предварительной обработки сырья: термическую обработку, измельчение, предварительное замораживание, ферментацию, обработку ионизирующими излучениями, ультразвуком, электрическим током и т.п. Все вышеперечисленные способы интенсификации в большей степени влияют на величину внутреннего диффузионного сопротивления. Однако на скорость процесса экстрагирования в ряде случаев большее влияние оказывает величина внешнего диффузионного сопротивления. На его величину можно воздействовать созданием режима кипящего слоя, наложением на систему электроимпульсных или ультразвуковых воздействий, а также низкочастотных механических колебаний.

Судя по данным научной литературы [1,2], наиболее эффективными являются аппараты, в которых колебания создаются вибрирующими устройствами (тарелками), расположенными в рабочем объеме. В результате такого воздействия снизу и сверху тарелок создается турбулизированный слой, который обеспечивает как разрушение конгломератов твердой фазы до начальных размеров частиц и их последующее измельчение, так и участие в контакте с жидкой фазой всей поверхности твердой фазы, интенсивное омывание и проникновение жидкой фазы в твердую. Такими существенными достоинствами этих виброэкстракторов являются простота конструкции, малая металлоемкость, низкие энергозатраты, высокая производительность.

Однако ряд вопросов, связанных с работой виброэкстракторов, не исследован. В частности, важное значение имеет расстояние от тарелки до дна экстрактора  $h_0$ , поскольку эта величина определяет зону

эффективного виброожиженного слоя, производительность аппарата, энергозатраты и т.п.

Поэтому целью работы является изучение влияния основных конструктивных и режимных параметров на процесс растворения сахарного сиропа как модельной системы в виброэкстракторе периодического действия.

**Объекты и методы исследований**

На основе проведенного обзора литературы [3,4,5] и результатов предварительных экспериментов были выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на эффективность работы аппарата, и определены границы их регулирования: амплитуда колебаний  $A=4-14$  мм; частота колебаний  $n=6,6-20$  Гц; расстояние от дна аппарата до тарелки  $h_0=40-100$  мм. При этом в ходе предварительных экспериментов было определено, что расстояние от тарелки до свободной поверхности воды не оказывает влияния на интенсивность растворения сахарного сиропа, находящегося на дне аппарата. Кроме того, было установлено, что форма отверстий тарелки также оказывает существенное влияние на интенсивность растворения сахарного сиропа. Поэтому в работе изучались тарелки с отверстиями цилиндрической и конической формы. Тарелка с коническими отверстиями изготовлена из оргстекла толщиной  $\delta=10$  мм, диаметр большего отверстия  $d_{\max}=5$  мм, диаметр меньшего отверстия  $d_{\min}=3$  мм, масса тарелки  $m_{\text{тар.к}}=192,2$  г, тарелка устанавливалась конусом вверх. Тарелка с цилиндрическими отверстиями изготовлена из нержавеющей стали толщиной  $\delta=2$  мм, диаметр отверстия  $d_{\text{отв}}=3$  мм, масса тарелки  $m_{\text{тар.ц}}=233,2$  г. Остальные параметры тарелок выбирались с учетом рекомендаций [5], а именно: доля свободного сечения тарелки  $S=16,5\%$ , длина юбки  $L=14$  мм.

Вибрационный экстрактор (рис. 1) состоит из цилиндрического корпуса 1, выполненного из кварцевого стекла с внутренним диаметром 140 мм и высотой 260 мм; прозрачного плоского днища 2, выполненного из оргстекла; устройств ввода 3 и вывода фаз 7; штуцера 8 для взятия проб; штуцера 9 для ввода модельного раствора. В корпусе установлен шток 4 с возможностью возвратно-поступательного движения в вертикальной плоскости, на котором жестко закреплена горизонтальная перфорированная тарелка 5, снабженная по периферии юбкой. Возвратно-поступательные движения штоку сообщаются при помощи кривошипно-шатунного механизма 6 от электродвигателя.

тродвигателя постоянного тока ПЛ-072. Переменное напряжение 110 В получается от промышленной сети 220 В 50 Гц через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), далее оно выравнивается мостовым двухполупериодным выпрямителем. Измерение действующего значения напряжения осуществлялось вольтметром Д533 (класс точности 1), значения токов измерялось амперметром Э309 (класс точности 1), приборами электромагнитной системы.

Разработку современного технологического оборудования целесообразно проводить с учетом его энергетической характеристики. Точная информация о величине затрачиваемой мощности позволит провести сравнительный анализ исследуемой конструкции с аналогичными аппаратами. Для изменения полезной мощности использовался расчетный метод, позволяющий вычислить мощность на валу электродвигателя при его работе в режиме, отличном от номинального. Методика определения полезной мощности описана в [6].

В качестве модельной системы был выбран 60%-й сахарный сироп, так как он имеет вязкую структуру, которая не дает ему быстро растворяться в аппарате. Это позволило провести исследование кинетики растворения сахарного сиропа при различных режимах работы аппарата. Концентрация сахарозы в растворе измерялась рефрактометром ИРФ 4546, погрешность измерения – по шкале сухих веществ по сахарозе  $\pm 0,1\%$ .

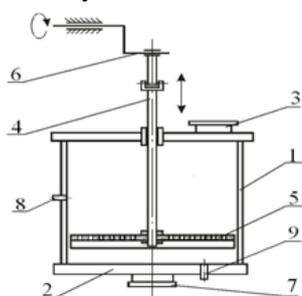


Рис. 1. Схема лабораторного экстрактора с вибрационной тарелкой

Сахарный сироп готовился следующим образом: в кипящую воду добавляли определенное количество са-

хара, доводили до кипения и варили в течение 20 мин, постоянно перемешивая, чтобы не допустить пригорания ко дну, для предотвращения кристаллизации сахара в сиропе добавляли лимонную кислоту. После этого сироп оставляли остывать при комнатной температуре и только затем его использовали в качестве модельной системы.

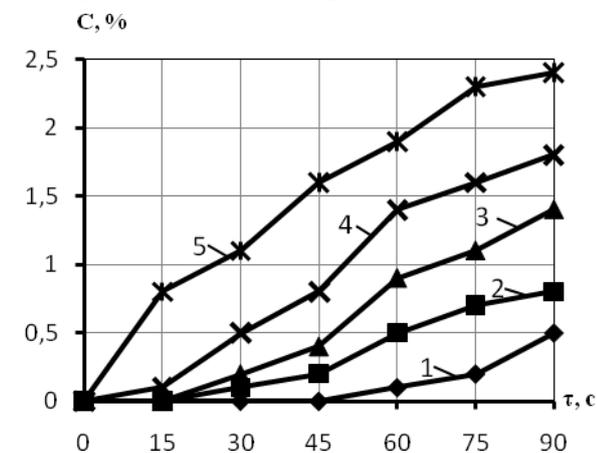
Экспериментальные исследования проводились следующим образом: устанавливались определенные параметры работы аппарата (амплитуда, тип тарелки, расстояние между тарелкой и дном аппарата), после чего в него заливалась вода объемом 2,5 л. При помощи шприца через штуцер 9 в аппарат вводился сахарный сироп, при этом соотношение сахарного сиропа и воды составляло 1:15. Отсчет времени начинался с момента включения вибрационной тарелки. Все исследования проводились при температуре 20 °С.

В ходе эксперимента из аппарата через каждые 15 секунд отбирались пробы жидкой фазы объемом 5 мл для определения концентрации сахарозы. Процесс растворения завершался по достижении равновесной концентрации сахарозы в растворе, которая была рассчитана и составила  $C_{равн} = 4,99\%$ .

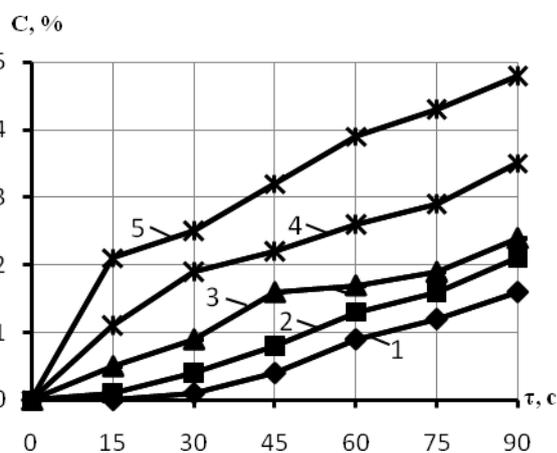
### Результаты и их обсуждение

Для определения рациональной частоты колебания вибрационной тарелки был выбран режим работы аппарата с параметрами:  $h_0 = 100$  мм и  $A = 4$  мм. При этих значениях  $A$  и  $h_0$  основное воздействие на растворение сахарного сиропа оказывает только частота колебаний вибрационной тарелки.

Анализ данных (рис. 2) показал, что с увеличением частоты колебаний вибрационной тарелки возрастает и интенсивность растворения сахарного сиропа, причем тарелка с коническими отверстиями обеспечивает в 1,5–2 раза более интенсивное растворение. Самое интенсивное растворение сиропа наблюдается для тарелок, перфорированных цилиндрическими отверстиями (рис. 2а), при  $n \geq 16,6$  Гц, для тарелок с коническими отверстиями (рис. 2б) при  $n \geq 13,3$  Гц.



а) цилиндрические отверстия



б) конические отверстия

Рис. 2. Кинетика растворения сахарного сиропа при различной частоте колебания тарелки ( $h_0 = 100$  мм,  $A = 4$  мм): 1– $n = 6,66$  Гц; 2– $n = 10$  Гц; 3– $n = 13,3$  Гц; 4– $n = 16,6$  Гц; 5– $n = 20$  Гц

С учетом данных (рис. 2) для определения рациональной амплитуды колебания тарелки был выбран режим с параметрами  $n=16,6$  Гц и  $h_0=100$  мм (рис. 3).

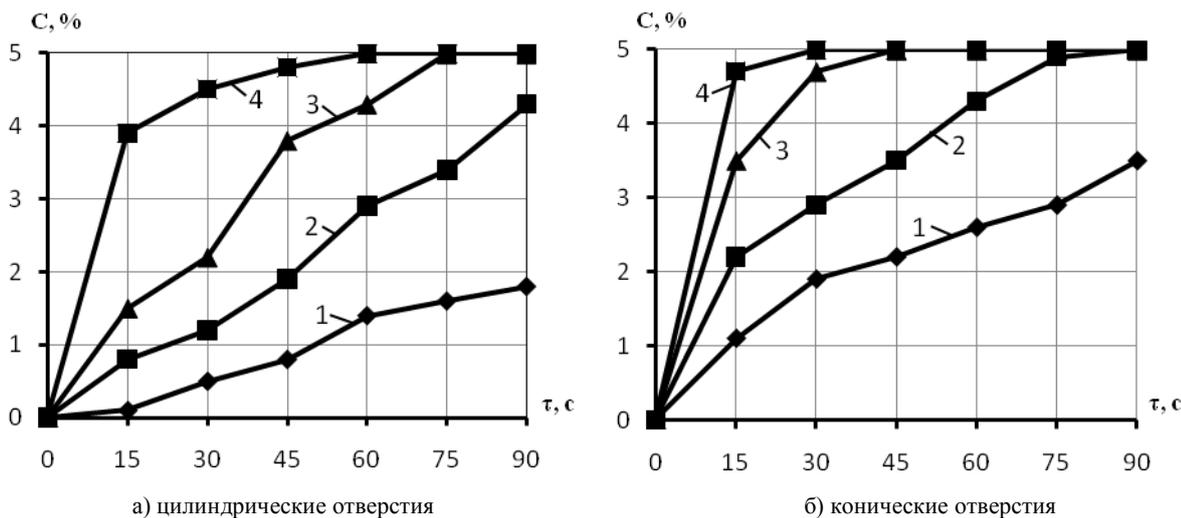


Рис. 3. Кинетика растворения сахарного сиропа в зависимости от амплитуды колебания тарелки ( $h_0=100$  мм,  $n=16,6$  Гц): 1– $A=4$  мм; 2– $A=8$  мм; 3– $A=10$  мм; 4– $A=14$  мм

Анализ данных (см. рис. 3) показывает, что с увеличением значения амплитуды стремительно возрастает интенсивность растворения сиропа. При дальнейшем анализе для тарелок с цилиндрическими отверстиями были приняты  $A=10, 14$  мм, а для тарелок с коническими отверстиями  $A=8, 10, 14$  мм, так как при этих значениях за исследуемый промежуток времени в аппарате устанавливается равновесная концентрация ( $C_{\text{равн}}=4,99\%$ ).

Из рис. 2, 3 видно, что при использовании тарелок с конической формой отверстий возрастает интенсивность растворения сиропа. Это вызвано тем, что струи жидкости, образующиеся при возвратно-поступательном движении тарелки с коническими отверстиями, обладают большей энергией по сравнению со струями, формируемыми тарелкой с цилиндрическими отвер-

стиями. Такая закономерность объясняется гидродинамикой истечения жидкости через отверстия и насадки. При истечении жидкости через конические насадки струя жидкости характеризуется большей скоростью и энергией по сравнению со струей, формируемой отверстиями цилиндрической формы [6].

На основе результатов предварительных экспериментов было установлено, что мощность, затрачиваемая на процесс растворения, зависит от амплитуды  $A$  и частоты колебаний  $n$  вибрационной тарелки, а расстояние от днища до тарелки и от тарелки до свободной поверхности жидкости не оказывает существенного влияния на ее величину. Поэтому следующим этапом исследования был анализ энергозатрат на растворение сахарного сиропа при различных режимах работы аппарата.

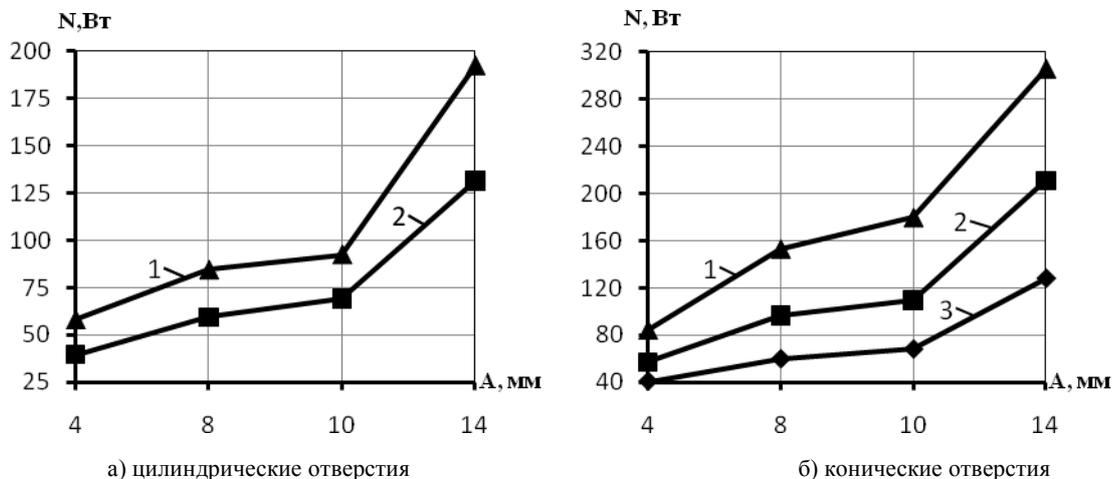


Рис. 4. Затраты мощности на растворение сахарного сиропа в виброэкстракторе ( $h_0=100$  мм): 1– $n=20$  Гц; 2– $n=16,6$  Гц; 3– $n=13,3$  Гц

Из рис. 4 видно, что при использовании тарелок с конической формой отверстий возрастают в среднем в 1,6 раза затраты мощности на перемешивание по сравнению с тарелкой, перфорированной цилиндрическими отверстиями.

Проанализировав данные рис. 2а, 4а для виброэкстрактора с тарелкой, перфорированной цилиндрическими отверстиями, можно рекомендовать  $n=16,6$  Гц. Этот выбор обусловлен тем, что при таком значении частоты колебаний достигается равновесная концен-

трация сахарозы в растворе (см. рис. 2а), а энергии затрачивается в среднем в 0,4 раза меньше, чем при  $n=20$  Гц (см. рис. 4а).

Рекомендуемая амплитуда колебаний для тарелки с цилиндрическими отверстиями  $A=10$  мм, так как только при  $A=10$  и 14 мм за исследуемый промежуток времени в аппарате устанавливается равновесная концентрация (см. рис. 3а). Однако при  $A=14$  мм затрачивается в 1,34 раза больше энергии (см. рис. 4а), поэтому с точки зрения экономичности выгодней использовать в виброэкстракторе  $A=10$  мм.

Для виброэкстрактора с тарелкой, перфорированной коническими отверстиями, можно рекомендовать  $n=16,6$  Гц. Поскольку при  $n=13,3$  Гц энергозатраты наименьшие (см. рис. 4б), но и растворение сиропа недостаточно (рис. 2б). При  $n=20$  Гц наблюдается самое интенсивное растворение сахарного сиропа, однако затраты мощности при этом почти в 1,5 раза выше, чем при  $n=16,6$  Гц.

Из анализа данных рис. 2б и 3б для тарелки с коническими отверстиями рекомендуются амплитуды  $A=8$  и  $A=10$  мм. Хотя лучшие результаты с точки

зрения интенсивности растворения сиропа получаются при  $A=14$  мм, энергозатраты при этом составляют 306,2 Вт, в то время как при  $A=8$  и  $A=10$  мм они равны 128,5 и 211,2 Вт соответственно.

Исследуемый виброэкстрактор является аппаратом периодического действия, его теоретическая производительность будет зависеть от объема обрабатываемого пространства  $V$  и от времени достижения равновесной концентрации  $\tau_{пр}$ .

Значительное увеличение внутреннего диаметра емкости виброэкстрактора приведет к увеличению диаметра тарелки, что нецелесообразно с точки зрения повышения нагрузки на ее периферийную область. Поэтому рациональным способом повышения производительности является увеличение объема за счет высоты обрабатываемого слоя. При этом важным параметром оказывается расстояние от дна аппарата до тарелки  $h_0$ . В данной работе проводились исследования по определению рационального значения  $h_0$  при ранее выбранных значениях  $A$  и  $n$ , результаты которых представлены на рис. 5.

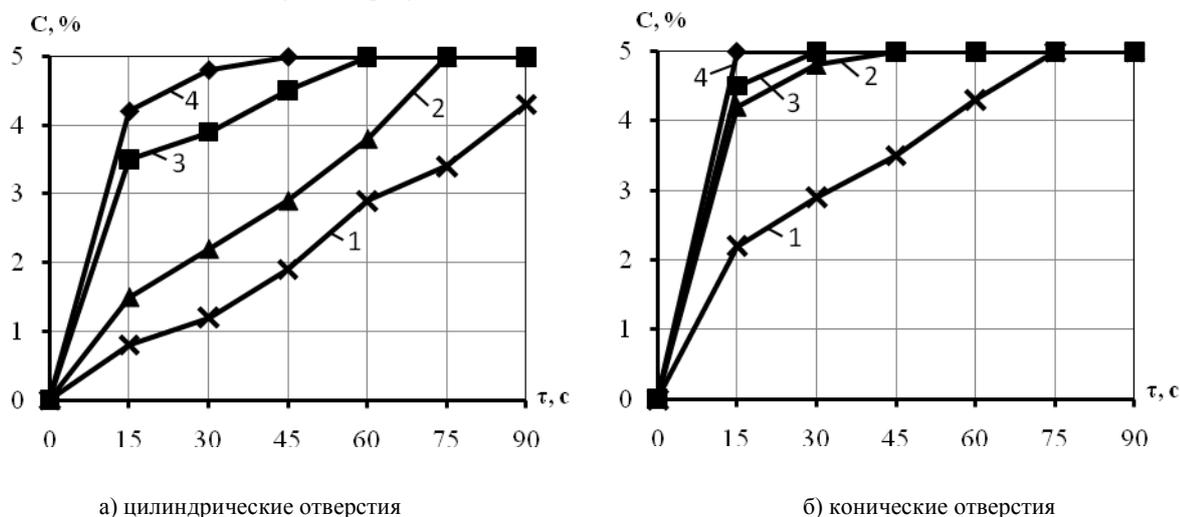


Рис. 5. Интенсивность растворения сахарного сиропа в зависимости от расстояния от дна аппарата до тарелки  $h_0$  ( $A=10$  мм,  $n=16,6$  Гц): 1– $h_0=100$  мм; 2– $h_0=80$  мм; 3– $h_0=60$  мм; 4– $h_0=40$  мм

Как видно из рис. 5, что с увеличением  $h_0$  уменьшается интенсивность растворения сахарного сиропа. Это объясняется тем, что вибрационное поле, создаваемое возвратно-поступательным движением тарелки, интенсивно действует только вблизи вибрационного органа (тарелки). С увеличением  $h_0$  снижается интенсивность воздействия вибрационного поля на сироп. Поэтому чрезмерное увеличение  $h_0$  нежелательно.

Для тарелок с цилиндрическими отверстиями можно рекомендовать  $h_0=60...80$  мм. При  $h_0=40$  мм равновесная концентрация наступает быстрее, но при этом и количество обрабатываемого продукта будет наименьшим. При  $h_0=100$  мм за исследуемый промежуток времени равновесная концентрация не достигается, что объясняется затуханием струй жидкости в обрабатываемом объеме.

Для тарелок с коническими отверстиями  $h_0$  может достигать 80...100 мм, что способствует повышению производительности без снижения интенсивности растворения сахарного сиропа.

Как отмечалось выше, форма отверстий оказывает существенное влияние на интенсивность растворения сиропа и позволяет сократить время достижения равновесной концентрации. С учетом выбранных значений амплитуды и частоты колебаний были проведены эксперименты по изучению влияния формы перфорации тарелки на интенсивность растворения сиропа.

Из рис. 6 видно, что лучшие результаты получают при использовании тарелок с коническими отверстиями, равновесная концентрация достигается уже на 45 секунды. В то время как в экстракторе с тарелкой, перфорированной цилиндрическими отверстиями, – на 75 секунды. Таким образом, при использовании тарелок с коническими отверстиями время обработки сырья сокращается в 1,7 раза, что также способствует увеличению производительности аппарата.

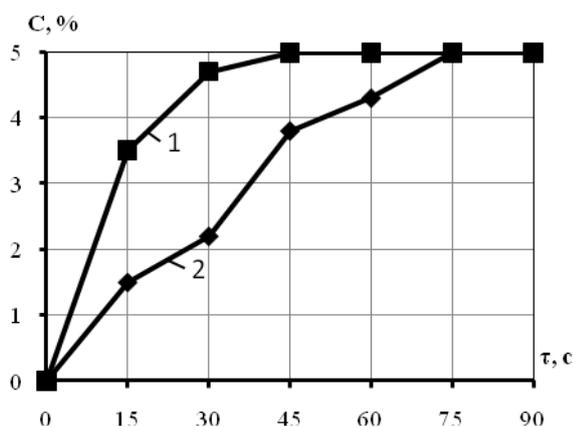


Рис. 6. Интенсивность растворения сахарного сиропа в зависимости от вида перфорации тарелки ( $A = 10$  мм,  $n = 16,6$  Гц,  $h_0 = 80$  мм): 1 – тарелка с коническими отверстиями; 2 – тарелка с цилиндрическими отверстиями

Установлено, что в процессах, связанных с растворением, лучшие результаты получаются при использовании тарелок с коническими отверстиями, при этом равновесная концентрация в виброэкстракторе достигается быстрее. При использовании в виброэкстракторе тарелок с цилиндрическими отверстиями можно рекомендовать следующие параметры:  $n=16,6-20$  Гц,  $A=10$  мм,  $h_0=60...80$  мм. Для тарелок с коническими отверстиями:  $n=16,6$  Гц,  $A=8-10$  мм,  $h_0=80...100$  мм.

Как показали выполненные исследования, повышение производительности виброэкстрактора целесообразно добиваться за счет увеличения  $h_0$ , при этом предпочтительны тарелки с коническими отверстиями. Проведенные исследования также позволили установить общие закономерности кинетики виброожиженного слоя в изучаемом аппарате при растворении сахарного сиропа.

#### Список литературы

1. Кизим, Н.Ф. Теоретический аспект разработки энергосберегающих экстракторов / Н.Ф. Кизим, Е.Н. Голубина // Пленарные докл. IV Международной конференции «ЭОС 2010». – Воронеж, 2010. – С. 30
2. Закономерности и перспективы применения виброэкстрагирования для переработки растительного сырья / В.Л. Завьялов, В.С. Бодров, Т.Г. Мисюра и др. // Пленарные докл. IV Международной конференции «ЭОС 2010». – Воронеж, 2010. – С. 2011.
3. Сорокопуд, А.Ф. Исследование процесса экстрагирования замороженных ягод клюквы в поле низкочастотных механических колебаний / А.Ф. Сорокопуд, М.В. Суменков // Совершенствование и разработка нового оборудования для пищевой промышленности: сб. научн. работ / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Вып. 1. – Кемерово, 2006. – С. 29–33.
4. Горлов, М.Д. Разработка и исследование вибрационного массообменного аппарата для экстрагирования плодово-ягодного сырья: дисс. ... канд. техн. наук / М.Д. Горлов. – Кемерово, 2005. – 157 с.
5. Иванов, П.П. Разработка технологии и аппаратурного оформления производства концентрированных плодово-ягодных экстрактов для молочной промышленности: дисс. ... канд. техн. наук / П.П. Иванов. – Кемерово, 2002. – 135 с.
6. К вопросу о расчете полезной мощности в вибрационном экстракторе / П.П. Иванов, А.Е. Ворыханов; Кемеров. техн. ин-т пищ. пром-ти. – Кемерово, 2010. – 9 с.: 1 ил. – Библиогр.: 7 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 03.12.10, № 679-В2010.
7. Плаксин, Ю.М. Процессы и аппараты пищевых производств / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, 2008. – 760 с.

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности»,  
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.  
Тел./факс: (3842)73-40-40  
e-mail: office@kemtipp.ru

#### SUMMARY

A.F. Sorokopud, A.E. Vorykhanov, P.P. Ivanov

#### INVESTIGATION OF VIBRATORY EXTRACTOR OPERATION WHEN DISSOLVING SUGAR SYRUP

The parameters affecting most of all the efficiency of the vibratory plate extractor operation when dissolving sugar syrup have been established and their application borders have been presented. The rational values of the main operating characteristics and vibratory extractor specifications have been determined. Some practical recommendations on using the vibratory extractor in the food processing industry have been given.

Vibratory extractor, kinetics of dissolving, power input.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology  
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia  
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40  
e-mail: office@kemtipp.ru

