

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

С.К. Волончук, А.Н. Сапожников, Л.П. Шорникова

*В статье приводится обоснование возможности воздействия электромагнитного поля инфракрасного излучения на влажный материал для интенсификации внутреннего теплообмена в процессе сушки. Получены эмпирические зависимости достоверно подтверждающие снижение энергозатрат, повышение качества продуктов. Экспериментально обоснованы режимные параметры технологии сушки растительного сырья.*

*Ключевые слова: электромагнитное поле (ЭМП), инфракрасное излучение (ИК), энергия, квант, длина волны, ИК-излучатель, технология, параметры, энергозатраты.*

Совершенствование процесса удаления влаги из растительного сырья при его переработке в продукты длительного хранения предполагает не только улучшение качественных показателей в виде максимального сохранения питательных и биологически активных веществ сырья, но и снижение энергозатрат, доля которых в стоимости готового продукта постоянно растет. Решающим в данном вопросе является выбор способа подвода энергии к воде, находящейся в сырье. До сих пор наиболее распространенными являются кондуктивный и конвективный способы. При кондуктивном способе перегретый пар нагревает плоскую или цилиндрическую поверхности, на которые наносится тонким слоем обезвоживаемый продукт. При конвективном способе продувается воздух, нагретый до определенных температур, над или через обезвоживаемый объект. КПД процессов низкий, т. к. реализуется с предварительным многократным преобразованием энергии, схематично показанным на рисунке 1. Существенным недостатком является необходимость дополнительного оборудования для утилизации и повторного использования тепловой энергии, что увеличивает и без того значительную металлоемкость технологического оборудования.

Кроме того, при расширении географии наиболее востребованных небольших предприятий, перерабатывающих сельскохозяйственное и дикорастущее растительное сырье, важную роль начинают играть достаточно простые способы получения энергоносителя, отбирающего влагу у сырья. В этом плане носители СВЧ и ИК энергии в настоящее время наиболее приемлемы, т. к. их источниками являются преобразователи энергии электрического тока в энергию колебаний электромагнитного поля (ЭМП) соответ-

ствующего диапазона длин волн (рисунок 2). При этом преобразуемая из электричества энергия практически без потерь полностью передается воде сырья, нагревая её и заставляя испаряться.

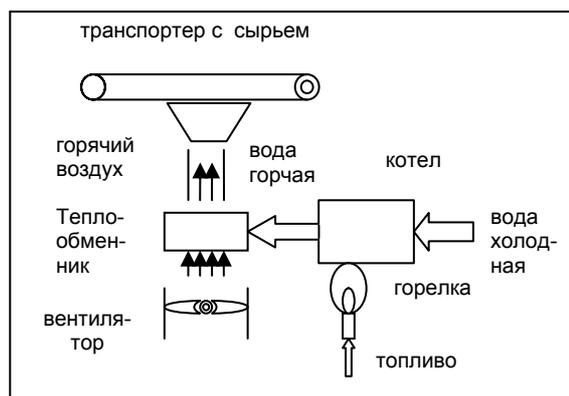


Рисунок 1 – Схема получения теплоносителя для конвективной сушки сырья

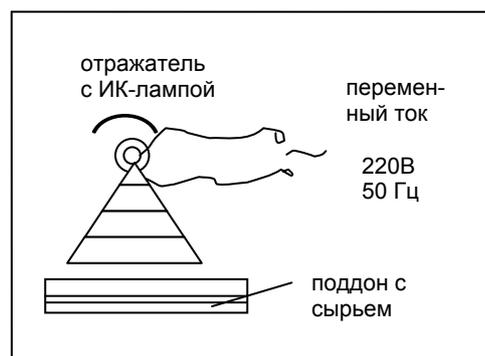


Рисунок 2 – Схема получения теплоносителя для инфракрасной сушки сырья

Установлено [1], что после начала действия импульса электромагнитного поля происходит быстрое увеличение температуры во всем объеме образца причем рост темпера-

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

туры в центре образца осуществляется интенсивнее, чем на его поверхности, и вскоре температура в центре образца оказывается выше, чем в поверхностных слоях. Таким образом, благодаря единичному импульсному воздействию электромагнитного поля удается изменить направление потока массы влаги, обусловленного термодиффузией. Это явление наступает тем раньше, чем больше мощность объемного источника теплоты. Увеличение мощности источника единичного объемного воздействия приводит также к росту усредненной температуры образца. При этом центральные слои образца находятся при более значительных температурах. Это, в свою очередь, должно интенсифицировать диффузию влаги в материале при тех же градиентах влагосодержания, т. к. коэффициент диффузии влаги в сильной степени зависит от температуры материала. То есть термолабильность материала сушки ограничивает рост подводимой мощности ЭМП.

Также установлено, что при единичном импульсном объемном воздействии электромагнитных полей появляется новый дополнительный фактор, интенсифицирующий внутренний массоперенос – градиент избыточного давления, величина которого зависит от мощности электромагнитного воздействия.

Немаловажным моментом в физике процесса является и то, что, как установили Губиев Ю.К. и др. (МТИПП), механизм перераспределения энергии ЭМП есть саморегулируемый процесс, т. к. поглощение энергии наибольшее в тех слоях, где влажность выше, т. е. в подсохших и высохших слоях поглощение энергии уменьшается, а т. к. количество подводимой энергии не изменяется, то происходит перераспределение её в более влажные слои. Это важное свойство взаимодействия объекта сушки и ЭМП обеспечивает равномерность удаления влаги (сушки) по слоям, а, значит, более высокое качество продукта [2].

Таким образом, дополнительное единичное импульсное энергетическое воздействие при конвективной сушке вызывает появление новых движущих сил процесса: градиента температуры и градиента избыточного давления, а саморегулирование поглощения энергии ЭМП более влажными слоями сырья способствует интенсификации процесса сушки.

Эффект интенсификации процесса сушки основан на том, что колебания молекул воды сырья, значительно усиливаются по амплитуде при совпадении их с такими же показа-

телями внешнего ЭМП. Как известно, в режиме резонанса потребуется значительно меньше энергии, чтобы вода за счет выделенной теплоты перешла в пар.

При этом необходимо учитывать следующее. Так как вода испаряется в замкнутом пространстве растительных клеток сырья, то, во-первых, это вызовет коагуляцию белков цитоплазмы клетки, а, во-вторых, повышение внутриклеточного давления при подводе большого количества энергии, очевидно, приведет к «микровзрыву» и выбросу паровоздушной смеси из ослабленных стенок клетки. В более мягком режиме повышение давления приведет к интенсивному просачиванию влаги через микропоры стенки клетки.

В этом плане ИК-излучатели более предпочтительны, т. к. оказывают «мягкое» воздействие на сырье. Н.Г. Селюковым, А.С. Гинзбургом установлено, что материалы способны пропускать инфракрасное излучение на глубину до 10 мм [3].

Лучшими на настоящий момент являются ИК-излучатели с кварцевыми трубками, имеющими максимум излучения в области спектра с длинами волн  $\lambda=1,0-2,4$  мкм. Малая термическая инерция позволяет применять генератор в импульсном режиме. При групповом расположении они создают высокую (до 35 Вт/см<sup>2</sup>) плотность потока энергии. Для сравнения, по данным П.Д. Лебедева, при конвективной сушке плотность теплового потока 750 Ккал/(м<sup>2</sup>.ч) при температуре агента 100 °С. ИК-излучение обеспечило плотность теплового потока 22500 Ккал/(м<sup>2</sup>.ч) [4].

Кроме положительного влияния на физику процесса, необходимо учитывать влияние ЭМП на изменение нативных (натуральных) свойств сырья.

В таблице 1 приведены данные об энергии различных видов химических связей

Таблица 1 – Энергия видов химической связи

Виды связи	Энергия связи, эВ
H–OH	5,2
H–CH <sub>3</sub>	4,5
H–HCH <sub>3</sub>	4,0
H <sub>3</sub> C–CH <sub>3</sub>	3,8
Водородная связь	0,1–0,15

В таблице 2 приведены данные об энергии квантов электромагнитного излучения.

Таблица 2 – Физические показатели видов излучения

Виды излучения	Характерная длина волны, см	Энергия кванта, эВ
Гамма лучи	$10^{-10}$	1240000
Рентгеновские лучи	$10^{-9}$	1240000
Ультрафиолетовое излучение	$3 \times 10^{-5}$	4,1
Видимый свет	$5 \times 10^{-5}$	2,5
Инфракрасное излучение	$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-2}$	1,24–0,012
Микроволны	10	$12 \cdot 10^{-6}$

Известно также, что энергия связи влаги в пищевых материалах, составляет около 0,2 эВ [2]. Из приведенных данных видно, что энергии кванта ИК-излучения на длине волны  $\lambda=1,0$  мкм достаточно для отрыва влаги от сухих веществ материала и интенсификации ее переноса, но недостаточно для разрыва химических связей, от которых зависит изменение биохимического состава продукта, а, значит, сохранение нативных свойств сырья в продукте. В [5] приводятся такие данные для сушки различного сырья: при  $\lambda = 2-10$  мкм, энергия кванта составляет 0,62–0,12 эВ.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать предположение, что использование энергии ИК излучения для сушки растительного сырья при определенных значениях изменяемых параметров процесса позволит добиться снижения удельных энергозатрат при максимальном сохранении биологически активных веществ.

Исследования целесообразности использования энергии ЭМП ИК диапазона длин волн для обезвоживания растительного сырья, проводили в ГНУ СибНИИП СРО Россельхозакадемии на примерах сушки укропа – представителя зеленных культур, моркови – представителя корнеплодов и наиболее распространенного продукта питания – картофельного пюре.

Анализом научных данных по вопросу исследования удельных энергозатрат при ИК сушке растительного сырья в зависимости от технологических параметров установлено, что наиболее общими, значимыми факторами, влияющими на процесс являются плот-

ность потока ИК-излучения  $E$  (кВт/м<sup>2</sup>), экспозиция вспышки ИК излучателей  $\tau$ (с) и величина измельчения сырья  $l$  или  $s$  (мм).

Область исследуемых параметров была выбрана априори и в соответствии с ГОСТами на сушеные продукты. Биохимические анализы до и после ИК-обработки проводились в лаборатории ГНУ СибНИИЖ.

Исследования проводили по программе ПФЭ на лабораторной установке (рисунок 3).

Установка позволяет исследовать параметры процесса сушки ИК-излучением с регулированием плотности потока 9–15 кВт/м<sup>2</sup>, температуры в камере 50–60 °С, продолжительности вспышки ИК излучателей 3–11 с в импульсном режиме и размеров измельчения сырья: длина отрезков укропа 20–40 мм, размер грани кусочков моркови 4–9 мм. Для опытов вымытое и измельченное сырье относительно ровным слоем раскладывалось на поддоне 6, рисунок 3, вставлялось в установку, затем на пульте блока управления устанавливали текущие параметры и включали установку. Далее исследуемые параметры поддерживались автоматически. Количество затраченной на сушку энергии регистрировалось счетчиком 11.

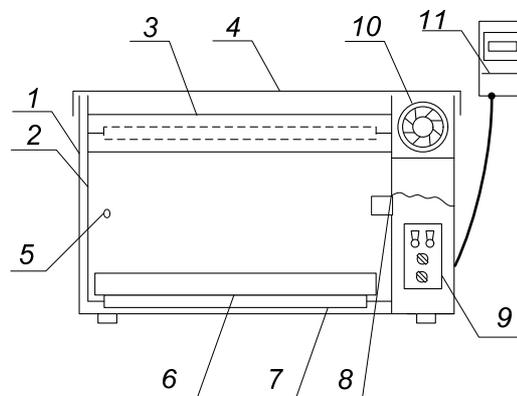


Рисунок 3 – Лабораторная установка для исследования режимов ИК-сушки растительного сырья

- 1 – корпус; 2 – отражатели панельные;
- 3 – ИК-излучатель с отражателем;
- 4 – верхняя крышка;
- 5 – перфорированная передняя стенка;
- 6 – поддон для сырья; 7 – поддон-отражатель;
- 8 – температурный датчик; 9 – блок управления;
- 10 – вентилятор; 11 – счетчик энергии

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены эмпирические зависимости, представляющие собой математические модели удельных энер-

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

гозатрат при ИК-сушке укропа (1) и моркови (2).

$$Q_1 = 5.844 - 0.167\tau - 0.65l \cdot E + 0.001l \cdot \tau + 0.008\tau^2 + 0.024E^2 \quad (1)$$

$$Q_2 = 2,01 - 0,11\tau - 0,011E \cdot s + 0,008s^2 + 0,013 \tau \cdot E - 0,001E^2 \quad (2)$$

Адекватность зависимостей реальному процессу подтверждается критерием Фишера.

Анализируя регрессионное уравнение, отражающее зависимость удельных энергозатрат при сушке укропа, можно отметить, что возрастание факторов удельной энергии и времени воздействия ИК-лучей (экспозиция), а также их парное взаимодействие, способствуют снижению удельных энергозатрат.

Исследованиями установлена область малых значений удельных энергозатрат (1,12–1,16 кВт·ч/кг) с центром экстремума – минимум при длине отрезков укропа в пределах 20–26 мм, удельной энергии в пределах 12,0–14,0 кВт·ч/м<sup>2</sup> и длительности ИК-облучения в пределах 6–10 с.

Анализируя регрессионное уравнение, отражающее изменение удельных энергозатрат, при сушке моркови можно отметить, что возрастание факторов удельной энергии и продолжительности воздействия ИК-лучей оказывают положительное влияние на снижение удельных энергозатрат. Увеличение размеров кусочков ведёт к увеличению энергозатрат. Следует отметить также, что при одной и той же экспозиции воздействия ИК-лучей, большие величины удельной энергии (12–15 кВт·ч/м<sup>2</sup>) способствуют уменьшению удельных энергозатрат, а меньшие величины (10 кВт·ч/м<sup>2</sup>) – увеличению удельных энергозатрат.

После расчёта уравнения, отражающего исследуемую зависимость, было получено значение минимума удельных энергозатрат, находящееся в границах изучаемой области факторов. Он равен 1,38 кВт·ч/кг при сечении кусочков моркови 3х3 мм, длительности воздействия ИК лучей 3 с и удельной энергии 15 кВт·ч/м<sup>2</sup>.

В результате исследований установлены значения параметров процесса: экспозиция вспышки ИК излучателей – 3 с, 7–11с, удельная энергия – 10–15 кВт·ч/м<sup>2</sup>, длина отрезков укропа 20, 40 мм, сечение кусочков сырья 3х3, 7х7 мм, при которых экономия энергозатрат составляет 26 % для укропа и 14 % для моркови в сравнении с удельными энергозатратами для конвективной сушки на серийной сушилке Г4-КСК-90 составляющими 1,55 кВт·ч/кг.

С целью определения соответствия качественных показателей энергетическим показателям анализировался биохимический состав укропа и моркови. Установлено, что сохраняются: витамины С до 50 %, А и Е, – 80–90 %, группы В – 70–80 %, аминокислоты, макро-микроэлементы – 95 – 100 %.

Обработкой данных биохимических исследований методом многомерного ранжирования установлено, что лучшие показатели по содержанию БАВ получены в образцах укропа длиной 20 и 40 мм при экспозиции ИК-облучения – 3 с и удельной энергии – 12кВт·ч/м<sup>2</sup>. По моркови лучшие показатели по содержанию БАВ получены в образцах с размером грани кусочков моркови 3х3 и 7х7 мм при экспозиции облучения 9–11с и удельной энергии 10–15 кВт·ч/м<sup>2</sup>.

Из представленного видно, что оптимальным параметрам ИК сушки образцов в отношении удельных энергозатрат соответствует наибольшее количество сохранившихся биологически активных веществ.

Исследования по использованию энергии ИК-излучения для интенсификации сушки картофельного пюре проводили на экспериментальной установке (рисунок 4).

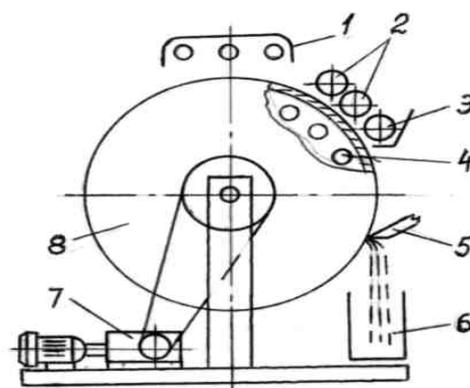


Рисунок 4 – Экспериментальная установка для исследования режимов сушки картофельного пюре

1 – отражатель с ИК-излучателями; 2 – валики нанесения пюре; 3 – шнек распределения пюре; 4 – ТЭНы; 5 – соскабливающий нож; 6 – бункер сбора сухого пюре; 7 – привод, 8 – сушильный валец

Как видно из рисунка 4 в установке, с целью интенсификации процесса сушки картофельного пюре, реализована идея о двустороннем подводе теплоты: ТЭНы нагревают изнутри сушильный валец, на который наносится тонкий слой пюре, а снаружи пюре облучается ИК-излучателями. Отражатель с ИК-излучателями расположен с учетом термолла-

бильности пюре и наибольшей влажности в начальный момент сушки. Сушка проводится по схеме: кондуктивный подогрев пюре, кондуктивная, совмещенная с ИК облучением, сушка, кондуктивная досушка. При этом влажность пюре уменьшается с 80 % до 8–10 %.

Продолжительность облучения варьировали в пределах от 0 до 24 с, плотность потока ИК-излучения – от 10 до 50 кВт/м<sup>2</sup>. Контролируемые параметры: температура поверхности вальца, полное время сушки, влажность вареного и сухого картофельного пюре, органолептические показатели и биохимические анализы до и после сушки. Качественные показатели картофельного пюре определяли: органолептически – цвет, вкус, запах готового продукта и консистенцию восстановленного пюре; по общепринятым методикам – содержание белка, витамина С и редуцирующих сахаров.

Валец установки прогревали до требуемой температуры – 170 °С, картофельное пюре загружалось в лоток и наносилось шнеком и валиками на сушильный валец. Сухое пюре подпружиненными ножами соскабливалось в приемный бункер. Для исследований использовали сорта картофеля Невский, Луговской, Адретта. Пюре влажностью 80 % готовилось в соответствии с ТУ 92-02.08.021-91, но без химико-технологических добавок.

В результате работы получены следующие результаты.

Статистической обработкой экспериментальных данных установлены зависимости:

3 – удельные энергозатраты на 1 кг готового продукта от плотности потока и продолжительности ИК-облучения

$$z_1 = 1,006 - 0,053\tau + 0,179 E + 0,002\tau^2 - 0,004\tau E - 0,009 E^2 \quad (3)$$

4 – производительность по испаренной влаге при тех же параметрах

$$z_2 = 29,05 - 1,851\tau + 4,038 E + 0,092\tau^2 + 0,127\tau E - 0,353 E^2 \quad (4)$$

Адекватность зависимостей реальному процессу подтверждается критерием Фишера.

Анализ зависимостей свидетельствует о том, что увеличение величины потока ИК-излучения (E) при одновременном уменьшении продолжительности облучения (τ) ведет к росту удельных энергозатрат, а производительность по испаренной влаге существенно зависит от совместного действия величины потока ИК-излучения и продолжительности его воздействия. Малая плотность потока, несмотря на рост продолжительности воз-

действия незначительно увеличивает производительность по испаренной влаге.

Продолжительность сушки картофельного пюре с 34 секунд при кондуктивной сушке, в которой нагрев поверхности сушильного вальца производится паром, снизилась до 24 секунд при нагреве вальца изнутри ТЭНами и облучении слоя пюре ИК излучателями с внешней стороны вальца. При этом температура поверхности вальца снижена с 170 °С до 95 °С, удельные энергозатраты уменьшились с 1050 кВт-ч/кг при кондуктивной сушке до 895 кВт-ч/кг или на 19 % при кондуктивно-инфракрасной.

Качественные показатели сухого картофельного пюре, полученного по новой технологии сушки, выше, чем, например, у пюре «Кнопг». Цвет сухого картофельного пюре белый, кремовый, светло-желтый в зависимости от сорта картофеля. Количество разрушенных клеток картофеля уменьшилось на 16...18 % по сравнению с контрольным образцом, полученным по существующей технологии, содержание витамина С на 7...9 % выше. Испарение влаги происходит в "мягком" режиме, что способствует сохранению целостности оболочек клеток, а, следовательно, уменьшению клейстеризации пюре при разведении его в жидкости. Это позволило отказаться от сульфитации и бланширования картофеля перед варкой и от внесения моноглицеридов (МГД) и аскорбиновой кислоты при протирке его в пюре. Так как в составе пюре нет МГД, то отпала необходимость во внесении консервантов, замедляющих окислительные процессы в период хранения пюре.

Приведенное в заключение сравнение результатов исследований по удельным энергозатратам при производстве продуктов длительного хранения из растительного сырья с использованием энергии ИК-излучения с обычной тепловой сушкой и СВЧ-сушкой свидетельствует о его преимуществе.

Тепловая сушка – это удаление содержащейся в материале влаги путем её испарения. Энергозатраты при этом определяются по формуле

$$Q = M \cdot r \quad (5)$$

где M – масса испаренной влаги, кг;

r = 2500 – 2,3 t<sub>ж</sub> – теплота парообразования, кДж/кг;

t<sub>ж</sub> – температура жидкости на поверхности испарения, °С.

Для 1 кг воды при температуре +20 °С удельные энергозатраты в идеале равны 1·(2500–2,38·20) = 2452,4 кДж/кг, или W=0,682 кВт-ч/кг.

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

В действительности приведенные в [6] энергозатраты значительно выше и имеют довольно большой разброс при сушке разных видов сырья: по данным И.Ф. Кудрявцева  $Q=4640...7140$  кДж/кг или  $W=1,3...2,2$  кВт-ч/кг; В.Г. Евдокимова  $Q=3125...12100$  кДж/кг или  $W=0,885...3,38$  кВт-ч/кг; В.А. Новикова при СВЧ-сушке растительного сырья  $Q=14200...14800$  кДж/кг или  $W=4,0...4,16$  кВт-ч/кг.

Суммируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что совокупное действие таких факторов, как существование на определенном этапе процесса больших значений средней температуры образца, градиентов температуры и давления, возникающих вследствие поглощения сырьем энергии ЭМП определенного диапазона длин волн ИК-спектра, способствующих выносу влаги из центра к периферийным слоям, вызывают интенсификацию процесса сушки и сокращение его продолжительности. Следствием сокращения продолжительности процесса является уменьшение удельных энергозатрат на сушку сырья.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мустяца, В.Т. Интенсификация внутреннего тепло и массопереноса во влажном материале дополнительным единичным нагревом в электромагнитном поле / В.Т. Мустяца, Ю.К. Берженарь // Шестая всес. науч-техн. конф. «Электрофизические методы обработки пищевых продуктов и сельскохозяйственного сырья»: тез. докл. – М., 1989. – С. 150–154.
2. Гинзбург, А.С. Применение методов кибернетики для повышения эффективности процессов электрофизической обработки пищевых и сельско-

хозяйственных продуктов / А.С. Гинзбург // Шестая всес. науч-техн. конф. «Электрофизические методы обработки пищевых продуктов и сельскохозяйственного сырья»: тез. докл. – М., 1989. – С. 141–150.

3. Гинзбург, А.С. Исследование оптических свойств некоторых пищевых продуктов в инфракрасной области спектра / А.С. Гинзбург, В.В. Красников, Н.Г. Селюков // Тез. докл. науч. конф., МТИПП, 1965. – 36–37 С.

4. Гинзбург, А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности / А.С. Гинзбург. – М., 1966. – 408 с.

5. Шаззо, Р.И. Продукты детского питания из растительного и мясного сырья инфракрасной сушки. Хранение и переработка сельхозсырья / Р.И. Шаззо, Г.П. Овчарова Г.П. – 2005, № 1. – С. 50 – 52.

6. Порсев, Е.Г. Основы создания электрокинетических технологий для агропроизводства: монография / Е.Г. Порсев. – Новосибирск, 2001. – 220 с.

**Волончук С.К.**, к.т.н., зав. лаб. биохимических технологий и переработки растительного сырья, Государственное Научное Учреждение Сибирский научно-исследовательский институт переработки сельскохозяйственной продукции, тел. 8(383)348-53-71, E-mail: GNU\_IP@ngs.ru;

**Сапожников А.Н.**, к.т.н., ст. науч. сотрудник лаборатории биохимических технологий и переработки растительного сырья, Государственное Научное Учреждение Сибирский научно-исследовательский институт переработки сельскохозяйственного сырья, тел. 8(383)348-53-71, E-mail: GNU\_IP@ngs.ru;

**Шорникова Л.П.**, ст. науч. сотрудник лаборатории биохимических технологий и переработки растительного сырья, Государственное Научное Учреждение Сибирский научно-исследовательский институт переработки сельскохозяйственного сырья, тел. 8(383)348-53-71, E-mail: GNU\_IP@ngs.ru