

# Теплофизический расчёт сушки свекловичного жома

**В.А. ЕРМОЛАЕВ**, д-р техн. наук, профессор (e-mail: ermolaevva@rambler.ru)<sup>1</sup>

**А.А. СЛАВЯНСКИЙ**, д-р техн. наук, профессор (e-mail: mgutu-sahar@mail.ru)<sup>2</sup>

**Д.П. МИТРОШИНА**, аспирант (e-mail: d\_mitr96@mail.ru)<sup>2</sup>

**Д.Е. ФЁДОРОВ**, канд. техн. наук, доцент<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия»

<sup>2</sup>Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ)

## Введение

На сахарных заводах в ходе производства образуется такое вторичное сырьё, как свекловичный жом [15–17]. Среди остальных вторичных ресурсов он занимает значительное место, что обусловлено его питательной ценностью как корма для животных, относительно высоким содержанием пектина [11, 12], а также общим объёмом его выработки в России, которая достигает свыше 20 млн т в год [3].

Свежий свекловичный жом на сегодняшний день используется недостаточно эффективно. Это обусловлено тем, что он является продуктом с относительно высоким влагосодержанием, из-за чего быстро портится. По той же причине возникают трудности с транспортировкой, что, в свою очередь, повышает его потребительскую стоимость [1, 5, 6, 14]. Хранение жома в сыром виде, кроме всего прочего, связано с ещё одной проблемой – накоплением большого количества масляной кислоты [4]. В ходе микробиологических и биохимических процессов свежий продукт закисает, что влечёт за собой переход сахара и почти всех пектиновых веществ в различные кислоты, и усвояемость жома снижается [2]. Всё это приводит к ухудшению консистенции, и животные отказываются его поедать.

Вышеуказанные факторы вызывают необходимость консервирования свекловичного жома. Наиболее эффективным способом является сушка до содержания влаги 12 % [7, 9]. Перед сушкой жом можно подвергать прессованию для предварительного удаления влаги [8, 10]. Высушенный продукт может использоваться как корм для сельскохозяйственных животных: в нём остаются практически все сухие вещества свёклы, за исключением сахара. Стоит также отметить, что по своей питательной ценности высушенный жом превосходит луговое сено [4].

## Материалы и методы

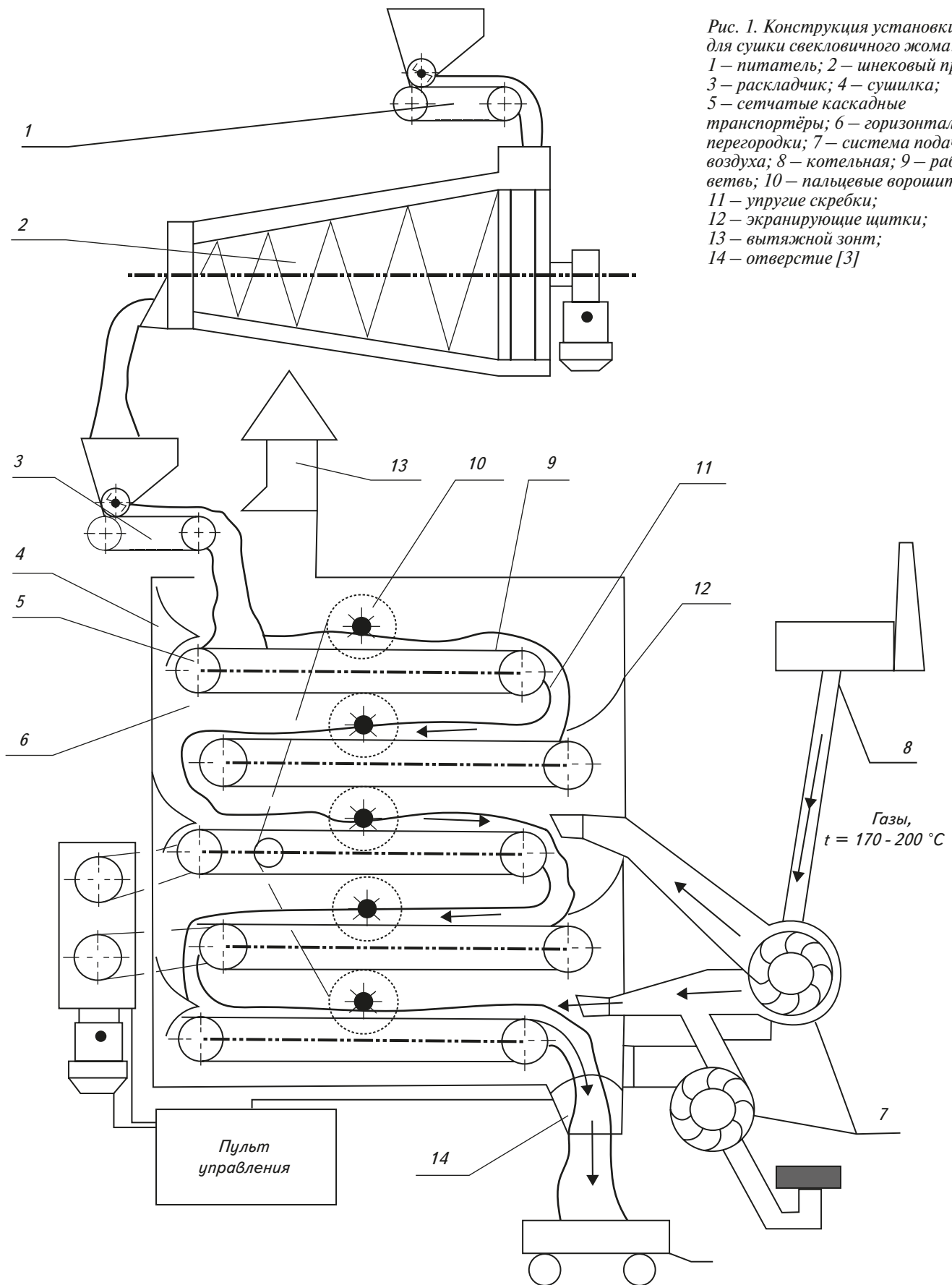
Одним из наиболее распространённых способов обезвоживания свекловичного жома является сушка

с использованием теплоты топочных газов. На рис. 1 приведена схема установки для сушки жома с использованием теплоты отработанных газов котельной [2]. Сушка в такой установке происходит в два этапа: на первом этапе жом обезвоживают с помощью шнекового пресса до влагосодержания 30–40 %, на втором в ленточной каскадной сушилке его доводят до влагосодержания 12–14 %. В качестве теплоносителя выступают нагретые топочные газы температурой 170–200 °С, которые проходят через сетчатые транспортеры с продуктом. При этом конструкцией установки предусмотрены две зоны сушки: в первую зону (верхняя часть) подаётся только топочный газ высокой температуры, а в нижнюю часть с помощью второго вентилятора направляется смесь топочных газов и воздуха, что даёт возможность снизить температуру досушивания [2].

Существенным недостатком использования нагретых топочных газов котельных в качестве теплоносителя является загрязнение жома продуктами сгорания, в результате чего конечный продукт содержит в себе микрочастицы золы и вредные вещества. А.М. Черников и Ю.С. Багликова предлагают технологию получения сухого жома путём отжима, гранулирования, активного вентилирования атмосферным воздухом и инфракрасной сушкой [13]. Такая технология позволяет получить сухой жом высокой чистоты, не загрязнённый частицами топочных газов. Его можно использовать, например, для производства пектиновых веществ [13].

Другой способ избежать загрязнения жома топочными газами – применение схемы косвенного нагрева, представленной на рис. 2. В данной системе топочные газы после котельной 1 направляются в теплообменник 2, где нагревают наружную поверхность труб, внутри которых проходит теплоноситель (воздух). Нагретый воздух с помощью вентилятора 5 нагнетается в сушильную камеру 3, внутри которой располагаются лотки с обезвоживаемым продуктом. Такая схема в отличие от схемы, представленной

Рис. 1. Конструкция установки для сушки свекловичного жома:  
 1 – питатель; 2 – шнековый пресс;  
 3 – раскладчик; 4 – сушилка;  
 5 – сетчатые каскадные  
 транспортеры; 6 – горизонтальные  
 перегородки; 7 – система подачи  
 воздуха; 8 – котельная; 9 – рабочая  
 ветвь; 10 – пальцевые ворошители;  
 11 – упругие скребки;  
 12 – экранирующие щитки;  
 13 – вытяжной зонт;  
 14 – отверстие [3]



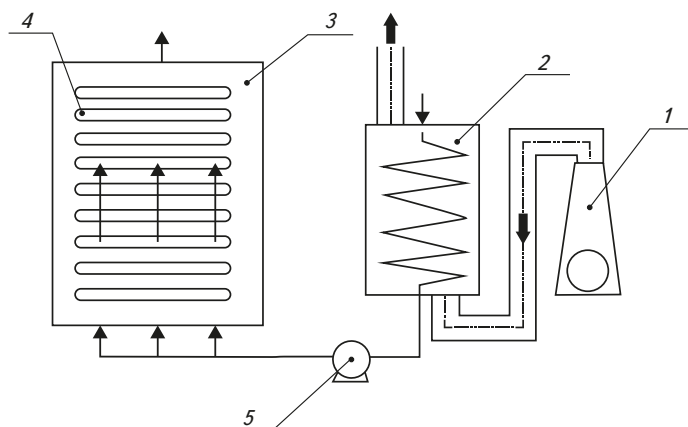


Рис. 2. Схема косвенного нагрева: 1 – котельная; 2 – теплообменник (калорифер); 3 – сушильная камера; 4 – лотки с продуктом; 5 – вентилятор

на рис. 1, исключает прямой контакт топочных газов с теплоносителем и, соответственно, загрязнение высушиваемого продукта.

Целью настоящей работы являлся теплофизический расчёт процесса сушки свекловичного жома.

**Результаты и обсуждение**

Для расчёта процесса сушки примем следующие условия: температура теплоносителя на входе в сушилку 140 °С, на выходе – 100 °С, производительность сушилки – 200 кг/час по массе исходного жома, начальное влагосодержание жома – 30 %, конечное – 12 %, температура поступающего на сушку продукта – 18 °С.

Задаёмся параметрами наружного воздуха  $t_1 = 18\text{ °С}$ ,  $\phi_1 = 40\%$  – точка 1 на диаграмме (рис. 3).

Далее проводим вертикаль из полученной точки 1 до пересечения с изотермой в точке 2 ( $t_2 = 140\text{ °С}$ ,  $\phi_2 = 1\%$ ), которая соответствует состоянию нагретого теплоносителя на входе в сушильную камеру. Линия 1–2 характеризует процесс нагрева воздуха в теплообменнике.

Для построения линии теоретического процесса сушки проводим из точки 2 линию  $i = \text{const}$  до пересечения с изотермой в точке 3 ( $t_3 = 100\text{ °С}$ ,  $\phi_3 = 4,5\%$ ). Полученный отрезок характеризует теоретический процесс сушки.

Определяем количество готового продукта  $m_{\text{сух}}$  по следующей формуле:

$$m_{\text{сух}} = m_{\text{пр}} \cdot \frac{1 - u_1}{1 - u_2} = 200 \cdot \frac{1 - 0,3}{1 - 0,12} = 159,09 \text{ кг/час,}$$

где  $m_{\text{пр}}$  – производительность сушилки по влажному продукту, кг/час;  $u_1, u_2$  – влагосодержание жома до и после сушки соответственно.

Рассчитываем количество удаляемой влаги:

$$m_{\text{вл}} = m_{\text{пр}} - m_{\text{сух}} = 200 - 159,09 = 40,91 \text{ кг/час.}$$

Расход сухого воздуха в сушильной установке на испарение влаги определим по формуле

$$L = \frac{m_{\text{вл}}}{x_3 - x_1} = \frac{40,91}{0,022 - 0,007} = 2727 \text{ кг/час,}$$

где  $x_1$  и  $x_3$  – влагосодержание воздуха до подогрева и после сушилки соответственно, г/кг.

Рассчитываем количество теплоты, необходимое для подогрева жома:

$$Q_{\text{под}} = m_{\text{сух}} \cdot c_{\text{ж}} \cdot (t_{\text{ж}2} - t_{\text{ж}1}) = \frac{159,09 \cdot 1,8 \cdot 10^3 (100 - 18)}{3600} = 6522 \text{ Вт,}$$

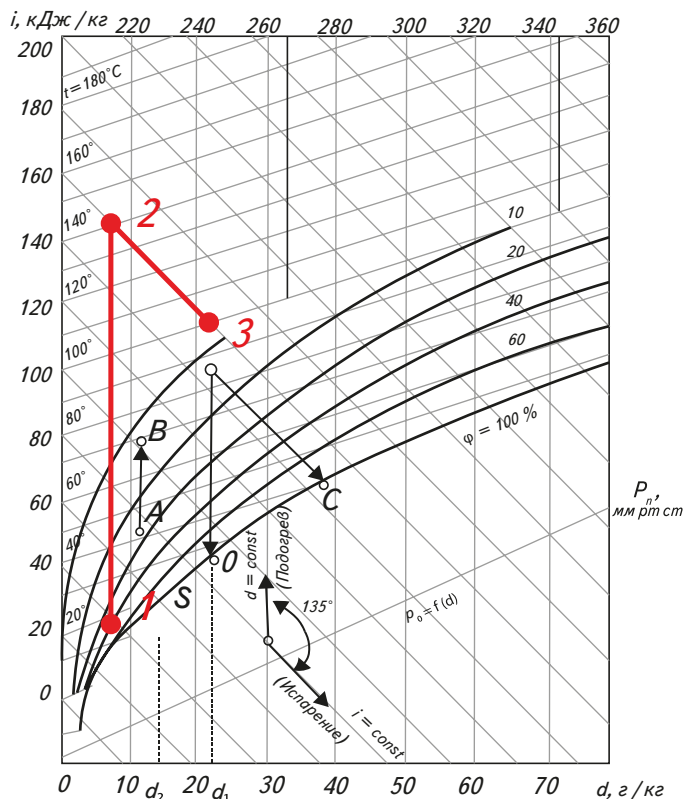


Рис. 3. Построение теоретического процесса сушки на i-d-диаграмме

где  $c_{ж}$  – теплоёмкость высушенного жома, Дж/(кг·К);  $t_{ж1}$  и  $t_{ж2}$  – температура жома до и после подогрева соответственно, °С.

Определяем количество теплоты в теоретической сушилке:

$$Q_T = L(I_3 - I_1) = \frac{2727(160 \cdot 10^3 - 38 \cdot 10^3)}{3600} = 92415 \text{ Вт},$$

где  $I_1$  и  $I_3$  – энтальпия воздуха соответственно перед подогревом и на выходе из сушилки, кДж.

Помимо нагрева и обезвоживания продукта теплота расходуется также на подогрев конструкций самой сушильной камеры, например транспортирующих устройств:

$$Q_{тр} = m_{тр} \cdot c_{тр} (t_{тр2} - t_{тр1}) = \frac{400 \cdot 0,5 \cdot 10^3 (100 - 18)}{3600} = 4555 \text{ Вт},$$

где  $m_{тр}$  – масса транспортирующих устройств, кг;  $c_{тр}$  – удельная теплоёмкость стали, Дж/(кг·К);  $t_{тр1}$  и  $t_{тр2}$  – температура транспортирующих устройств соответственно до и после сушки.

Из общего количества теплоты необходимо вычесть то количество теплоты, которое вносится влагой, содержащейся в поступающем на сушку свекловичном жоме:

$$Q_B = m_B \cdot c_B \cdot t_{ж1} = \frac{200 \cdot 0,3 \cdot 4,19 \cdot 10^3 \cdot 18}{3600} = 1257 \text{ Вт},$$

где  $m_B$  – количество влаги в жоме, поступающем на сушку, кг;  $c_B$  – теплоёмкость воды, Дж/(кг·К).

Примем потери теплоты в окружающую среду в количестве 15 % от общего количества теплоты в калорифере. Тогда общее количество теплоты, которое должно быть подведено в калорифер, определяется по следующей формуле:

$$Q = (Q_{под} + Q_T + Q_{тр} - Q_B) \cdot 1,15 = (6522 + 92415 + 4555 - 1257) \cdot 1,15 = 117570 \text{ Вт}.$$

Поскольку расход теплоты в калорифере составляет  $Q = L(I_{г2} - I_{г1})$ , то

$$(I_{г2} - I_{г1}) = \frac{Q}{L} = \frac{117570 \cdot 3600}{2727} = 155208 \text{ Дж/кг сух. воз.},$$

где  $I_{г1}$  и  $I_{г2}$  – энтальпия топочных газов до котельной и после калорифера соответственно, кДж.

Отсюда определяем энтальпию топочных газов на выходе из калорифера:

$$I_{г2} = 155,208 + I_{г1} = 155,208 + 38 = 193,208 \text{ кДж/кг сух. воз.}$$

Полученное значение  $I_{г2}$  соответствует температуре топочных газов на выходе из калорифера, равном 178 °С. Принимаем разность температур топочных газов и теплоносителя после калорифера 10 °С, тогда температура топочных газов на входе в калорифер составит 188 °С.

Рассчитываем количество топочных газов, необходимых для подогрева воздуха в калорифере:

$$M_{т.г.} = \frac{Q}{r_{т.г.} \cdot x_{т.г.}} = \frac{117570}{1991 \cdot 0,10} = 590 \text{ кг/час},$$

где  $r_{т.г.}$  – удельная теплота конденсации топочных газов при  $t = 188$  °С;  $x_{т.г.}$  – паросодержание топочных газов.

На основании полученных данных определяем удельный расход топочных газов:

$$m_{т.г.} = \frac{M_{т.г.}}{m_{вл}} = \frac{590}{40,91} = 14,4 \text{ кг топ. газов/кг испар. влаги}.$$

Необходимое количество топочных газов для нагрева теплоносителя в значительной степени зависит от паросодержания. Стоит отметить, что представленные расчёты являются теоретическими и могут отличаться от реальных условий: конструкции и теплоизоляции калорифера и сушильной камеры, реального паросодержания топочных газов, условий окружающей среды и т. д.

### Заключение

Таким образом, выполнен теплофизический расчёт процесса сушки жома с использованием косвенной схемы нагрева. Рассчитаны затраты энергии на подогрев теплоносителя в калорифере, определён расход топочных газов. Предложенная в данной работе методика может применяться при теплоэнергетической оценке проектируемых сушильных установок не только для свекловичного жома, но и для любых других продуктов. Результаты исследований могут представлять интерес для работников сахарной промышленности, инженеров и научных сотрудников, работающих в данной сфере.

### Список литературы

1. Булавин, С.А. Безотходная энергосберегающая технология сушки и переработки свекловичного жома / С.А. Булавин, К.В. Казаков, А.С. Колесников // Бюллетень научных работ Белгородской

государственной сельскохозяйственной академии им. В.Я. Горина. – 2008. – № 15. – С. 96–101.

2. Булавин, С.А. Сушильная установка как элемент энергосберегающей технологии сушки свекловичного жома / С.А. Булавин, К.В. Казаков, В.В. Билько // Бюллетень научных работ Белгородской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Я. Горина. – 2005. – № 3. – С. 77–79.

3. Гурин, А.Г. Жом как ценнейший продукт сахарного производства / А.Г. Гурин, Ю.В. Басов, В.В. Гнеушева // Russian Agricultural Science Review. – 2015. – Т. 5. – № 5-1. – С. 251–255.

4. Выбор рациональных параметров процесса сушки свекловичного жома в импульсном виброкипящем слое пониженного давления / А.В. Дранников, Е.В. Литвинов, А.С. Полканов, Д.К. Костина // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2017. – Т. 79. – № 4 (74). – С. 31–39.

5. Ермолаев, В.А. Теоретическое обоснование и практическая реализация технологии сухого сырного продукта : специальность 05.18.04 «технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодильных производств» : дисс. ... д-ра техн. наук / Ермолаев Владимир Александрович ; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2013. – 466 с.

6. Ермолаев, В.А. Определение температур вакуумной сушки твёрдых сыров / В.А. Ермолаев, А.Н. Расщепкин // Сыроделие и маслоделие. – 2009. – № 4. – С. 44–45.

7. Ермолаев, В.А. Разработка температурных режимов вакуумного концентрирования молока / В.А. Ермолаев, О.Н. Иваненко, М.В. Онюшев // Вестник КрасГАУ. – 2016. – № 9. – С. 121–127.

8. Разработка математической регрессионной модели процесса прессования свекловичного жома на прессе глубокого отжима / С.Н. Зобова, Л.Н. Фролова, Г.В. Алексеев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – Т. 83. – № 4 (90). – С. 31–36.

9. О снижении энергозатрат при сушке свекловичного жома / О.А. Мурашкина, М.А. Редченко, В.А. Авроров, Г.В. Авроров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2019. – Т. 8. – № 2 (46). – С. 160–164.

10. Патент № 2462867 Российская Федерация, С1, А23В 7/02. Способ вакуумной сушки ягод : № 2011122882 : заявл. 06.06.2011 : опубл. 10.10.2012 : бюл. № 28 / Ермолаев В.А., Фёдоров Д.Е., Масленникова Г.А.; заявитель ГОУ ВПО Кемеровский

технологический институт пищевой промышленности.

11. О совершенствовании технологии производства пектиносодержащих пищевых волокон из свекловичного жома / Е.А. Сарафанкина, Л.А. Авророва, М.А. Редченко, В.А. Авроров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2019. – Т. 8. – № 2 (46). – С. 165–169.

12. Инновационные способы получения пектина из различных видов растительного сырья / М.Ю. Тамова, Е.В. Барашкина, Р.А. Журавлёв [и др.] // Новые технологии. – 2018. – № 4. – С. 79–84.

13. Черников, А.М. Технология сушки свекловичного жома активным вентилированием / А.М. Черников, Ю.С. Багликова // Тенденции развития современного естествознания и технических наук. – 2017. – С. 106–109.

14. Шевцов, А.А. Некоторые аспекты совершенствования технологий сушки свекловичного жома / А.А. Шевцов, А.В. Дранников // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 1. – С. 86.

15. Славянский, А.А. Пути повышения качества продукции в сахарной промышленности / А.А. Славянский, А.Р. Сапронов. – М. : Агропромиздат, 1985. – 39 с.

16. Славянский, А.А. Пути повышения качества и выхода сахара-песка / А.А. Славянский, А.Р. Сапронов // Международный сельскохозяйственный журнал. – 1988. – № 6. – С. 75–80.

17. Славянский, А.А. Качество сахара-песка и его оценка / А.А. Славянский, В.И. Тужилкин. – М. : ЦНИИТЭИпищепром, 1975. – 29 с.

**Аннотация.** Статья посвящена теплофизическому расчёту сушки свекловичного жома с косвенной системой нагрева теплоносителя. Рассмотрены способы сушки свекловичного жома. Проведён расчёт количества теплоты, необходимой для подвода энергии в калорифере при заданных начальных условиях (температура теплоносителя на входе и выходе, производительность сушилки, начальное и конечное влажосодержание свекловичного жома, температура продукта). Определён удельный расход топочных газов на сушку свекловичного жома при заданных условиях.  
**Ключевые слова:** сахар, свекловичный жом, температура, сушка, *i-d*-диаграмма.

**Summary.** The article is devoted to the thermophysical calculation of sugar beet pulp drying with an indirect heat carrier heating system. The methods of drying beet pulp are considered. The calculation of the amount of heat required to supply energy in the heater under given initial conditions (heat carrier temperature at the inlet and outlet of the dryer, dryer performance, initial and final moisture content of beet pulp, product temperature) was carried out. The specific consumption of flue gases for drying sugar beet pulp under given conditions was determined.

**Keywords:** sugar, beet pulp, temperature, drying, *i-d*-diagram.