

Исследование процессов вакуумной сушки сахара^S

В.А. ЕРМОЛАЕВ, д-р техн. наук, профессор¹ (e-mail: ermolaevvla@rambler.ru)

А.А. СЛАВЯНСКИЙ, д-р техн. наук, профессор² (e-mail: mgutu-sahar@mail.ru)

Д.Е. ФЁДОРОВ, канд. техн. наук, доцент³ (e-mail: fedorov_de@inbox.ru)

В.А. ГРИБКОВА, канд. техн. наук, доцент² (e-mail: vera_gribkova@list.ru)

Н.В. НИКОЛАЕВА, канд. техн. наук, доцент² (e-mail: nata_nik@inbox.ru)

¹ ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова»

² ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)»

³ ФГБОУ ВО «Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия»

Введение

Совершенствование технологических процессов, повышение надёжности и производительности оборудования, разработка способов получения сахара высокого качества с минимальными затратами являются важнейшими задачами сахарной промышленности. В производстве сахара немаловажную роль играет сушка. От данного процесса во многом зависит качество получаемого продукта [2–4, 8–10].

В производственном процессе выходящий после центрифугирования сахар имеет достаточно высокую температуру – 60–80 °С и влажность до 1,5 %. Если при таких условиях отправить сахар на хранение, это приведёт к образованию комков [6, 7], что является нежелательным. Поэтому после центрифуги обязательно следуют сушка и охлаждение сахара до температуры хранения 25–40 °С [11]. Сушка, как правило, осуществляется горячим воздухом до содержания влаги 0,10–0,15 % для хранения в мешках и 0,03–0,05 % – при бестарном хранении.

На рис. 1 приведена схема совмещённого сушильно-охладительного аппарата для сахара [1]. Данный аппарат состоит из двух секций – сушильной 1 и охлаждающей 2. Обе секции наклонены в сторону движения сахара. В сушильную секцию поступает горячий воздух в прямооток с сахаром,

предварительно проходя через калорифер 4. Внутри барабана имеются пересыпные лопатки. При вращении барабана сахар с их помощью перемешивается и движется в требуемом направлении. Далее он переходит в охлаждающую секцию, куда подаётся холодный воздух. После охлаждающей секции сахар удаляется из аппарата через питатель 6 [1].

Существуют также сушильные аппараты, работающие по принципу виброкипящего слоя, в которых через слой сахара пропускается воздух. При этом сахар интенсивно перемешивается воздухом, что повышает скорость и качество сушки.

Возможен способ сушки сахара с использованием пониженного давления – так называемая вакуумная сушка. За счёт создания вакуума удаётся снизить температуру кипения воды и таким образом понизить температуру сушки [5].

Целью настоящей работы являлось исследование процессов вакуумной сушки сахара при различных технологических режимах.

Объекты, условия и методы исследования

В качестве объекта исследования выступал сахар влажностью 1,2 % и температурой 60 °С. Указанная температура была выбрана исходя из условий производства [11].

Для сушки использовалась вакуумная сушильная установка, схема камеры которой приведена на рис. 2. В данной установке сахар сушится в ёмкости 5, внутри которой вращается мешалка 4. Тепло к продукту подводится от плоских инфракрасных нагревателей 3. Изменение содержания влаги определяли по изменению массы продукта с помощью весов 6.

В начале исследования проводили подбор температуры и остаточного давления при сушке сахара. Температуру варьировали в пределах от 30 до 70 °С с шагом в 10°, остаточное давление – от 2±0,5 до 7±0,5 кПа с шагом в 1 кПа. Таким образом, проводился двухфакторный эксперимент. Из-за особенностей зависимости температуры кипения от давления была составлена матрица экспериментов (табл. 1), где плюсом обозначено

Таблица 1. Матрица двухфакторного эксперимента

Температура нагрева, °С	Остаточное давление в камере, кПа					
	2	3	4	5	6	7
30	+	+	+	–	–	–
40	+	+	+	+	+	–
50	+	+	+	+	+	+
60	+	+	+	+	+	+
70	+	+	+	+	+	+

^S Выбор спонсора научных публикаций осуществляется по усмотрению редакции, любая взаимосвязь между видами деятельности спонсора и результатами научной работы исключается



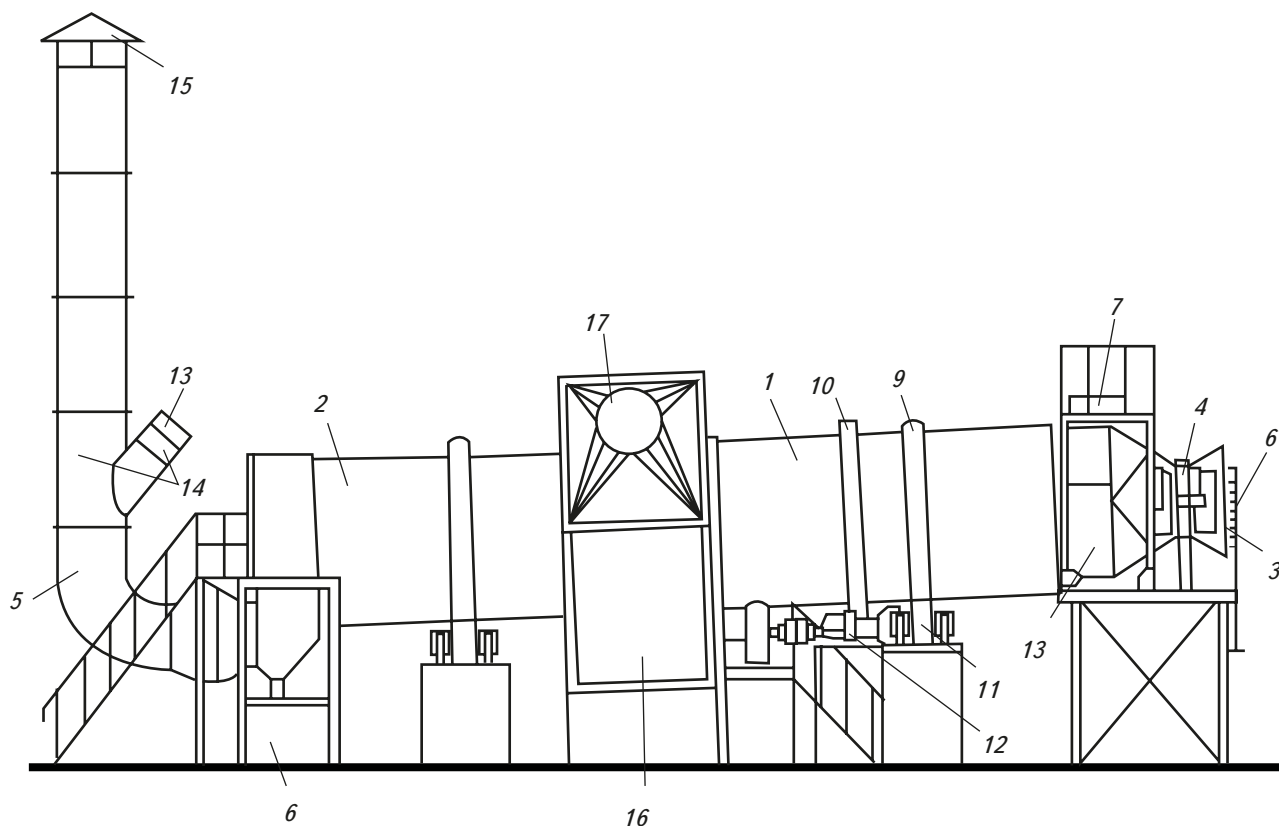


Рис. 1. Схема совмещённого сушильно-охладительного аппарата для сахара [1]: 1 – сушильная секция; 2 – охлаждающая секция; 3 – раструб; 4 – калорифер; 5 – всасывающая труба; 6 – питатель; 7 – питающее устройство; 8, 14 – жалюзи; 9 – бандажи; 10 – венечная пара; 11 – ролики; 12 – электродвигатель; 13, 15, 17 – патрубки; 16 – кожух

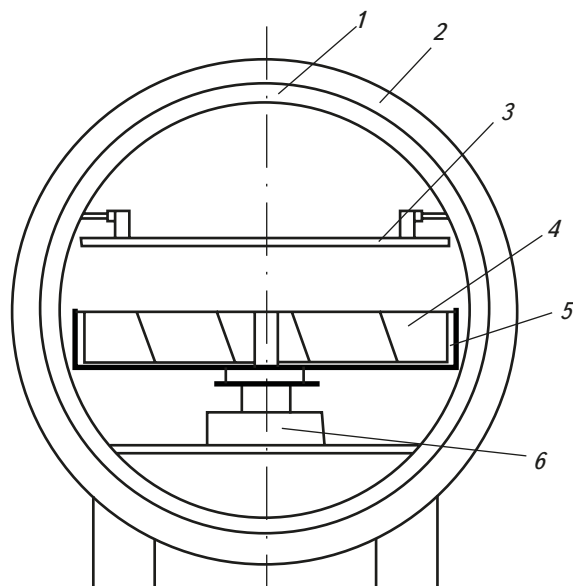


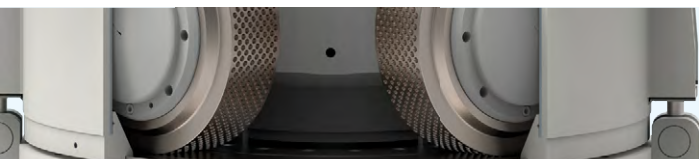
Рис. 2. Схема камеры для сушки сахара: 1 – корпус камеры, 2 – теплоизоляционный слой, 3 – плоские инфракрасные излучатели, 4 – мешалка, 5 – ёмкость для продукта, 6 – весы

проведение эксперимента при данном сочетании давление/температура, а минусом – его отсутствие ввиду того, что при данном остаточном давлении температура кипения выше установленной температуры нагрева.

Результаты и их анализ

На рис. 3 приведены графики, отражающие изменение содержания влаги, скорости изменения содержания влаги и температуры в сахаре в процессе сушки при температуре нагрева 50 °С и остаточном давлении 3 кПа.

Как видно из рисунка 3а, наибольшая скорость сушки наблюдается в первые минуты и по мере удаления влаги снижается. Общая продолжительность вакуумной сушки сахара составила 12 мин.



Что касается температуры, то после включения вакуум-насоса и создания разряжения в камере происходит резкое вскипание влаги на поверхности сахара и интенсивное её удаление, что обуславливает снижение температуры продукта (рис. 3б). Наименьшая температура наблюдалась через 4–5 мин сушки и составила около 25 °С. После этого вследствие нагрева инфракрасным излучателем температура сахара повышается и достигает установленного значения в 50 °С через 10 мин после начала процесса сушки.

На рис. 4 приведён объёмный график продолжительности вакуумной сушки сахара при различном остаточном давлении и температуре нагрева.

Из графика на рис. 4 видно, что температура сушки оказывает более сильное влияние на интенсивность удаления влаги, чем остаточное давление: повышение температуры сушки от 30 до 70 °С

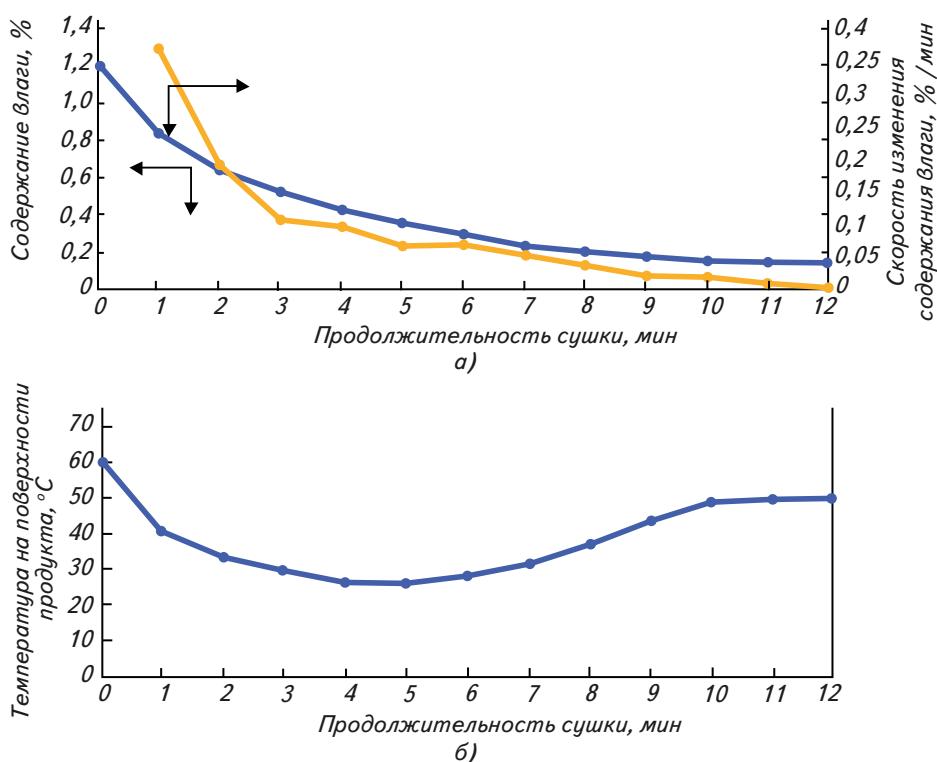


Рис. 3. Графики вакуумной сушки сахара при остаточном давлении 3 кПа и температуре нагрева 50 °С: а – содержание влаги и скорость изменения содержания влаги; б – температура на поверхности продукта

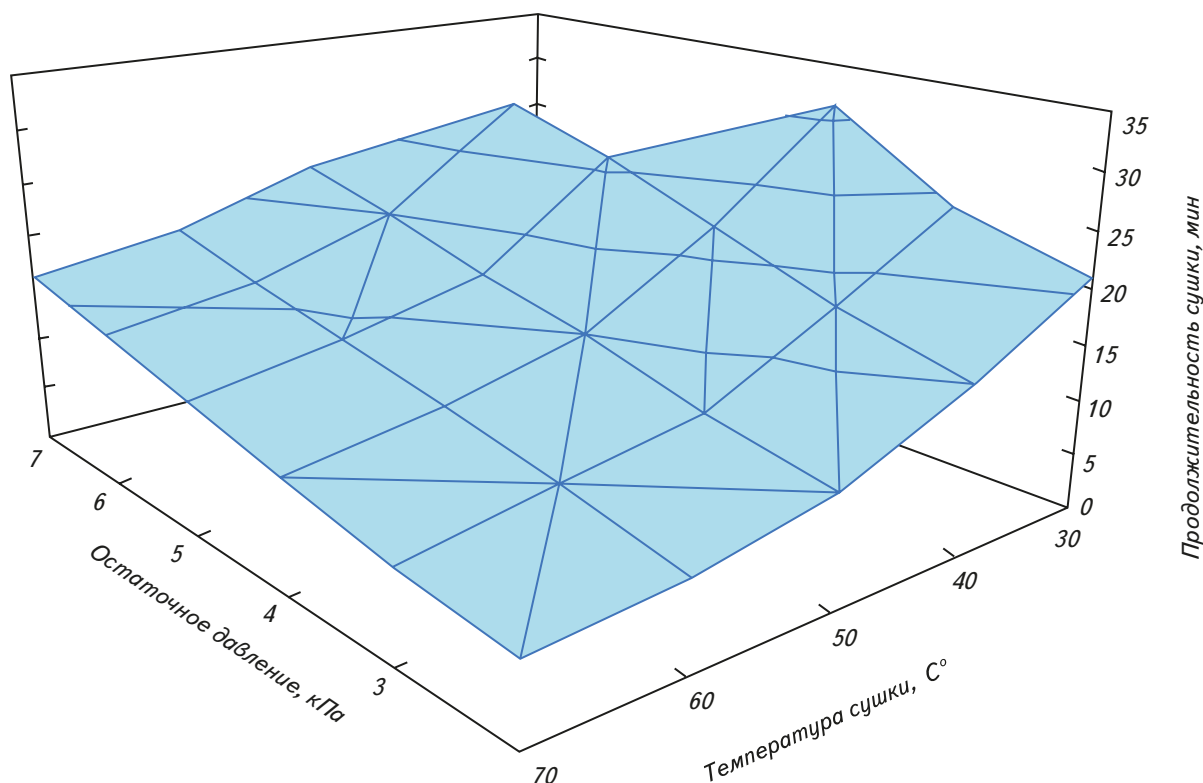


Рис. 4. График зависимости продолжительности вакуумной сушки сахара от температуры и остаточного давления



влечёт за собой сокращение продолжительности обезвоживания в среднем в 2,9 раза. Что касается остаточного давления, то понижение данного параметра также обуславливает сокращение продолжительности сушки вследствие более интенсивного кипения влаги. Сушка при остаточном давлении 2 кПа меньше, чем при остаточном давлении 6 кПа, в среднем в 2,2 раза. Исходя из того, что на выходе из сушилки температура сахара должна составлять 25–40 °С, целесообразно использовать вакуумную сушку при температуре 30–40 °С и остаточном давлении 3 кПа.

Следующим этапом работы являлось исследование влияния толщины слоя продукта на процесс вакуумной сушки сахара. Проводились исследования при температуре нагрева 30 °С, остаточном давлении 3 кПа и толщине слоя сушки 10, 20, 30, 40 и 50 мм. В табл. 2 представлены данные по продолжительности вакуумной сушки и содержанию влаги в сахаре при различной толщине слоя. Содержание влаги приведено в виде диапазона, поскольку замеры данного показателя проводили в нескольких повторностях.

С увеличением толщины слоя сушки от 10 до 50 мм продолжительность обезвоживания увеличивается почти в 2 раза. При этом в некоторой степени увеличивается также диапазон содержания влаги – от 0,005 до 0,009 %, что свидетельствует о незначительном снижении степени равномерности сушки по объёму лотка. Это зависит не только от толщины слоя сушки, но и от используемой мешалки. Увеличение толщины слоя сушки, тем не менее, несёт в себе и положительный эффект, который выражается в увеличении производительности сушильной установки. С учётом вышесказанного рекомендуемая толщина вакуумной сушки сахара составляет 30–40 мм.

Исследования по сушке сахара проводились также при отложенном вакуумировании. Идея состояла в том, чтобы снизить температуру сахара на выходе из сушилки за счёт создания разряжения не сразу после начала процесса, а через определённый промежуток времени. На рис. 5 приведены графики вакуумной сушки сахара указанным способом. Температура нагрева в этом случае составляла 40 °С, толщина слоя сушки – 30 мм, а остаточное давление в 3 кПа в камере создавали через 18 мин после начала сушки. В течение первых

18 мин сахар сушился при атмосферном давлении. Скорость изменения содержания влаги в сахаре при этом составляла около 0,019 %/мин. Температура на поверхности сахара равнялась 40 °С. При понижении давления в камере до 3 кПа происходило резкое вскипание влаги и интенсивный теплоотвод от поверхности сахара. На графиках (рис. 5а) видно скачкообразное изменение скорости удаления влаги и снижение температуры. Скорость удаления влаги на промежутке 18–22 мин после начала сушки зафиксиро-

Таблица 2. Показатели эффективности сушки сахара при различной толщине слоя

Показатель	Толщина слоя сушки, мм				
	10	20	30	40	50
Время сушки, мин	16	19	24	28	30
Содержание влаги, %	0,138–0,142	0,137–0,144	0,137–0,145	0,138–0,147	0,138–0,149

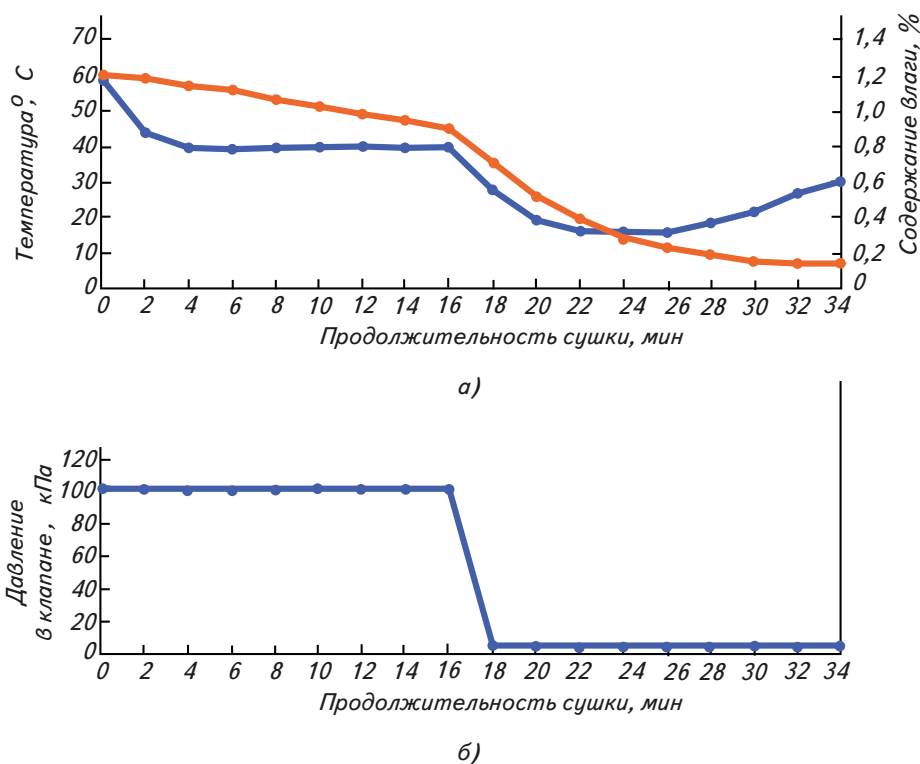


Рис. 5. Графики сушки сахара при отложенном вакуумировании: а – температура на поверхности продукта и содержание влаги; б – остаточное давление



вана на уровне 0,067 %/мин. Наименьшая температура составляла порядка 15 °С и наблюдалась через 24 мин после начала процесса сушки. К концу процесса температура сахара на выходе повысилась до 30 °С.

Выводы и заключение

В ходе проведённой работы были исследованы процессы вакуумной сушки сахара, определены рациональные технологические режимы: температура нагрева 30 °С, остаточное давление 3 кПа, толщина слоя сушки 30–40 мм. Показана возможность использования отложенного вакуумирования для регулирования температуры сахара на выходе из сушилки. За счёт отложенного вакуумирования можно изменять температуру продукта на выходе несмотря на то, что при этом несколько увеличивается продолжительность сушки сахара по сравнению с обычным вакуумным способом. Регулировать температуру на выходе помимо отложенного вакуумирования можно также путём изменения режимов работы нагревателей.

Исходя из вышеизложенного, возможным направлением дальнейших исследований представляется подбор рационального способа подвода теплоты к продукту при сушке.

Результаты представленных исследований могут быть полезны работникам сахарной промышленности и научным сотрудникам, работающим в данной сфере.

Список литературы

1. *Азрилевич, М.Я.* Сахарная энциклопедия / М.Я. Азрилевич. — 2004. Электронный ресурс. URL: <http://econf.rae.ru/article/10994> (дата обращения: 04.11.2021). <https://sugar.ru/node/13676>.
2. *Горина, Д.Ю.* Оценка эффективности установки для сушки

и охлаждения сахара / Д.Ю. Горина // Матер. Междунар. научно-практич. конф. «Актуальные проблемы агроинженерии и пути их решения», посвя. 40-летию Белгородского ГАУ. 19 ноября 2018 г. — С. 248–252.

3. *Ермолаев, В.А.* Теоретическое обоснование и практическая реализация технологии сухого сырного продукта : специальность 05.18.04 : дис. ... д-ра техн. наук / Ермолаев Владимир Александрович. — Кемерово, 2013. — 466 с.

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

5. 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.

6. *Просекоев, А.Ю.* Подбор остаточного давления для вакуумного концентрирования жидких мо-

лочных продуктов / А.Ю. Просекоев, В.А. Ермолаев // Достижение науки и техники АПК. — 2010. — № 6. — С. 69–70.

7. *Пичурина, И.В.* Интенсификация процесса сушки и охлаждения сахара / И.В. Пичурина, С.А. Чугунов // Будущее науки — 2013: матер. Междунар. молодёжн. научн. конф. — 2013. — С. 125–127.

8. *Ермолаев, В.А.* Разработка режимов вакуумной сушки мёда / В.А. Ермолаев, А.А. Славянский // Хранение и переработка сельхозсырья. — 2021. — № 1. — С. 52–61.

9. Calculating the process of loose material mixing / E.V. Semenov, A.A. Slavyanskiy, I.A. Nikitin [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. — 2021. — Т. 57. — № 3–4. — С. 292–298.

10. *Славянский, А.А.* Центрифугирование и его влияние на выход и качество сахара / А.А. Славянский. — М., 2007. — 180 с.

11. *Хафеман, Х.* Сушка и охлаждение сахара с учётом специфических требований и условий окружающей среды / Х. Хафеман, Х. Грибель // Сахар и свёкла. — 2013. — № 1. — С. 20–25.

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния технологических режимов вакуумной сушки сахара на эффективность процесса. Установлено влияние таких параметров, как температура, остаточное давление и толщина слоя сушки на продолжительность обезвоживания и содержание влаги в продукте. Определены рациональные технологические режимы: температура нагрева 30 °С, остаточное давление 3 кПа, толщина слоя сушки 30–40 мм. Показана возможность использования отложенного вакуумирования для регулирования температуры сахара на выходе из сушилки.

Ключевые слова: кристаллический сахар, вакуум, давление, температура, сушка сахара, вакуумная сушка, режим сушки.

Summary. The article is devoted to the study of the influence of technological modes of vacuum drying of sugar on the efficiency of the process. The influence of parameters such as temperature, residual pressure and thickness of the drying layer on the duration of dehydration and moisture content in the product has been established. Rational technological modes were determined: heating temperature 30 °С, residual pressure 3 kPa, drying layer thickness 30–40 mm. The possibility of using delayed vacuuming to regulate the temperature of sugar at the outlet of the dryer is shown.

Keywords: crystalline sugar, vacuum, pressure, temperature, sugar drying, vacuum drying, drying mode.

