

А. В. Дранников [A. V. Drannikov]
 А. В. Квасов [A. V. Kvasov]
 А. С. Полканов [A. S. Polkanov]
 Д. К. Костина [D. K. Kostina]

УДК 636.087.1:542.47

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
 ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СУШКЕ
 СВЕКЛОВИЧНОГО ЖОМА**

**USE OF THE THEORY OF SIMILARITY FOR STUDYING OF REGULARITIES
 OF HEAT EXCHANGE WHEN DRYING A BEET PRESS**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»,
 Россия, Воронеж, e-mail: drannikov@list.ru

Аннотация. На процесс сушки свекловичного жома влияние оказывают температура, скорость перегретого пара, удельная нагрузка материала на газораспределительную решетку и давление в сушильной камере. При соблюдении гидродинамического и теплового подобия с учетом масштабных коэффициентов, метод теории подобия позволяет распространять результаты исследований, полученных на экспериментальной модели, на промышленный объект.

Методы и результаты. Исследуемый процесс сушки свекловичного жома в импульсном вибрирующем слое характеризуется большим количеством и многообразием параметров. Полученные данные на экспериментальной установке необходимо адаптировать к полупромышленным и промышленным сушильным установкам. Поэтому был использован метод теории подобия для описания процесса теплообмена при сушке свекловичного жома. Данный метод позволяет распространять результаты исследований, полученных на экспериментальной модели, на промышленный объект при соблюдении гидродинамического и теплового подобия с учетом масштабных коэффициентов [1]. Поэтому можно рассматривать процесс сушки в экспериментальной и промышленной сушильной установке как один процесс с изменяющимися параметрами, отличающимися только масштабом.

Заключение. Полученные критериальные уравнения можно использовать при проектировании полупромышленных и промышленных сушильных установок для свекловичного жома при соблюдении гидродинамического, теплового подобия и с учетом масштабного перехода.

Ключевые слова: сушка, свекловичный жом, перегретый пар, теплообмен, теория подобия.

Abstract. The drying process of beet pulp is influenced by temperature, the speed of superheated steam, the specific load of the material on the gas distribution grid and the pressure in the drying chamber. Subject to hydrodynamic and thermal similarity, taking into account scale factors, the similarity theory method allows you to extend the results of studies obtained on an experimental model to an industrial facility

Methods and results. The studied process of drying beet pulp in a pulsed vibrating boiling layer is characterized by a large number and variety of parameters. The data obtained in the experimental installation must be adapted to semi-industrial and industrial drying plants. Therefore, the similarity theory method was used to describe the heat transfer process during drying of beet pulp. This method allows you to extend the results of studies obtained on an experimental model to an industrial facility subject to hydrodynamic and thermal similarity, taking into account scale factors [1]. Therefore, it is possible to consider the drying process in an experimental and industrial drying plant as one process with varying parameters that differ only in scale.

Conclusion. The received criteria equations can be used at design of semi-industrial and industrial drying installations for a beet press at respect for hydrodynamic, thermal similarity and taking into account large-scale transition.

Key words: drying, beet pulp, superheated steam, heat exchange, similarity theory drying, beet press, superheated steam, heat exchange, theory of similarity.

Введение. Одной из основных предпосылок для интенсификации процесса сушки пищевых продуктов является применение вибрационных сушилок. Равномерность кипения слоя во многом зависит от свойств обрабатываемого материала. Для сыпучих материалов, имеющих малое трение между частицами и не склонных к аг-

регированию, как одно вибрационное воздействие, так и одна продувка теплоносителем могут создавать хорошую структуру слоя [2]. В виброкипящем слое таких материалов можно снижать скорость продуваемого сушильного агента до нуля.

Для некоторых продуктов создать однородный кипящий слой только путем продувки теплоносителя трудно, также трудно создается и чисто виброкипящий слой. Только наличие вибрации и аэродинамических сил продуваемого через слой сушильного агента создают равномерное ожигание слоя. К таким продуктам следует отнести свекловичный жом, так как он обладает полидисперсностью и высокой влажностью, способствующей агрегатированию частиц [3, 4]. Кроме того, влажность материала сильно влияет на скорость транспортирования. В работе [5] отмечается, что в увлажненном состоянии продукт обладает повышенными адгезионными свойствами, в результате чего нарушается закономерность вибротранспортирования.

В качестве сушильного агента для свекловичного жома использовали перегретый пар пониженного давления, который с одной стороны позволяет осуществлять процесс с высокой интенсивностью, а с другой получить сухой свекловичный жом высокого качества с возможностью его дальнейшего использования в виде сырья для производства пектиновых веществ, кормовых витаминных добавок и т.д. [6, 7].

На процесс сушки свекловичного жома перегретым паром пониженного давления в импульсном виброкипящем слое большое влияние оказывают разнообразные параметры. К таким параметрам следует отнести температуру T_n и скорость v_n перегретого пара, удельная нагрузка материала на газораспределительную решетку $q_{уд}$, давление пара в сушильной камере p . Влияние этих параметров на кинетику сушки исследовали на экспериментальной установке, а результаты исследований опубликованы в открытой печати [8, 9].

Цель и задачи. Целью нашей работы являлось применение метода теории подобия к изучению процесса теплообмена при сушке свекловичного жома в импульсном виброкипящем слое.

Для реализации поставленной цели требуется изучение влияния режимных параметров процесса сушки на коэффициент теплообмена и получение критериальных уравнений, описывающих процесс теплообмена при сушке свекловичного жома перегретым паром пониженного давления в импульсном виброкипящем слое в периоде постоянной и падающей скорости сушки.

Объекты и методы. Исследования по кинетике сушки проводились в периодическом режиме на экспериментальной сушильной установке [8]. При этом влажность продукта определяли методом отбора проб. Для этого изготовили специальное устройство, которое позволяло отбирать пробы без разгерметизации установки. Причем отбор проб производился по длине и высоте рабочей камеры с целью определения равномерности сушки продукта. Окончательную влажность жома определяли высушиванием продукта в сушильном шкафу при температуре 378 К согласно методике, предусмотренной ГОСТ Р 54901 – 2012 «Жом сушеный. Технические условия».

Для описания процесса теплообмена вначале определяли интенсивность сушки при различных режимных параметрах [2] по формуле:

$$j = \frac{NG_c}{100F}, \quad (1)$$

где N – скорость сушки, %/с; G_c – масса абсолютно сухих веществ в жоме, кг; F – поверхность испарения влажного жома, м².

В импульсном виброкипящем слое процесс испарения происходит по всей поверхности частиц жома, поэтому поверхность испарения находили по формуле:

$$F = \frac{6G}{\rho_m d_3}, \quad (2)$$

где G – масса влажного жома, загружаемого в экспериментальную сушильную установку, кг; ρ_m – плотность свекловичного жома, кг/м³; d_3 – эквивалентный диаметр частиц жома, м.

Эквивалентный диаметр для влажного жома определяли, используя следующее выражение:

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi n \rho_m}}, \quad (3)$$

где m – масса пробы, кг; n – число частиц в пробе, шт.

Процесс теплообмена характеризуется величиной коэффициента теплоотдачи (теплообмена) α , который вычисляли согласно экспериментальным данным по выражению:

$$\alpha = \frac{Q}{T_n - T_m}, \quad (4)$$

где Q – общее количество принятого свежловичным жомом тепла, Вт/м²; T_n , T_m – температура соответственно перегретого пара и материала, К.

Величину Q определяли по формуле:

$$Q = rj,$$

где r – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг.

Расчитанный коэффициент теплообмена α входит в критерий Нуссельта [1]. В нашем случае обобщенное критериальное уравнение конвективного теплообмена между перегретым паром и свежловичным жомом имело вид:

$$Nu = f \left(Re, \frac{T_n}{T_m}, \varepsilon, \frac{W}{W_{кр1}}, \frac{P_n}{P_{атм}} \right), \quad (5)$$

где Nu – критерий Нуссельта, характеризующий интенсивность перехода теплоты на границе поток теплоносителя – поверхность материала; Re – критерий Рейнольдса, характеризующий соотношение сил инерции и трения в потоке теплоносителя;

$\frac{T_n}{T_m}$ – температурный симплекс, характеризующий особенности теплообмена при углублении зоны испаре-

ния; ε – порозность импульсного виброкипящего слоя в период подвода вибраций, характеризующая соотношение высоты слоя и эффективной высоты компактного слоя (слоя без зазора между частицами), т.е. в нашем случае учитывает влияние на теплообмен начальной удельной нагрузки материала на газораспределительную решетку

$\frac{W}{W_{кр1}}$ – параметрический критерий, представляющий отношение средней влажности материала в период убывающей скорости сушки к первой критической влажности материала и учитывающий уменьшение влажности

материала в периоде убывающей скорости сушки; $\frac{P_n}{P_{атм}}$ – отношение разряжения в сушильной камере к атмосферному давлению.

В уравнении (5) не были учтены критерии Прандтля Pr и Грасгофа Gr . Это обусловлено тем, что критерий Прандтля для газов (в нашем случае перегретого пара) как при нагревании, так и при охлаждении является величиной постоянной, практически не зависящей от температуры и давления. Критерий же Грасгофа характеризует соотношение трения, инерции и подъемной силы в потоке, что в рассматриваемом случае не актуально, так как движение пара является вынужденным. Кроме этого, в уравнении (5) не было учтено влияние параметров вибрации на интенсивность теплообмена, вследствие того, что вибрации к слою подводились относительно короткое время ($\tau_{виб} = 3$ с.), которое не менялось и было постоянным во всех проведенных опытах.

Результаты и их обсуждение. В результате анализа кривых интенсивности сушки свежловичного жома при различных режимных параметрах процесса (рис. 1...4) видно, что в периоде постоянной скорости сушки интенсивность j линейно увеличивается с уменьшением влажности материала. Максимальная интенсивность сушки достигается при первом критическом влагосодержании, которое в зависимости от режима сушки, составляет $W_{кр1}^c = 35...55$ %. Увеличение j объясняется тем, что в процессе сушки частицы жома испытывают значительную усадку и, согласно формуле (2), уменьшается поверхность испарения частиц жома. Но при этом в первом периоде скорость сушки остается постоянной, и в соответствии с формулой (1) наблюдается увеличение интенсивности сушки.

Во втором периоде сушки происходит резкое снижение j , обусловленное уменьшением скорости сушки жома. Необходимо отметить, что во всех проведенных опытах по сушке жома на экспериментальной установке амплитуда и частота колебаний газораспределительной решетки оставались неизменными и составляли соответственно $A = 7$ мм и $f = 12,5$ Гц.

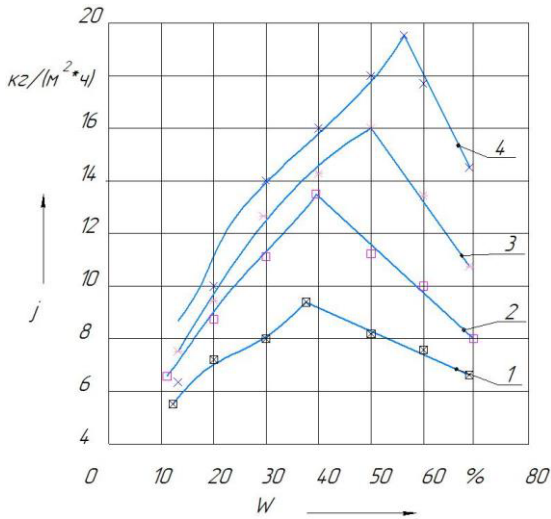


Рис. 1. Кривые интенсивности сушки свекловичного жома при различных температурах перегретого пара, К; 1 – 393; 2 – 413; 3 – 433; 4 – 453, при $v = 3$ м/с, $P = 60$ кПа, $q = 16$ кг/м²

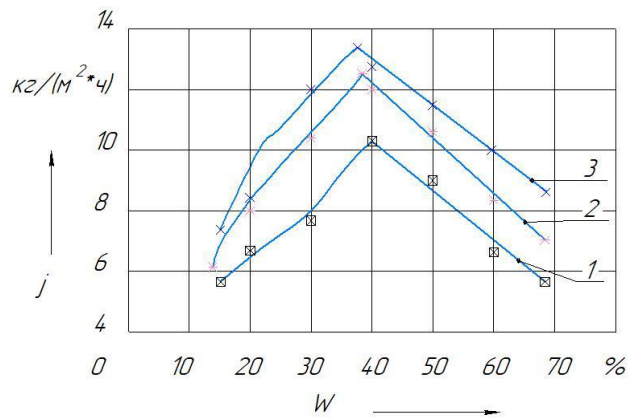


Рис. 2. Кривые интенсивности сушки свекловичного жома при различных скоростях перегретого пара, м/с; 1 – 3; 2 – 4; 3 – 5, при $T_{II} = 413$ К, $q = 16$ кг/м², $P = 60$ кПа

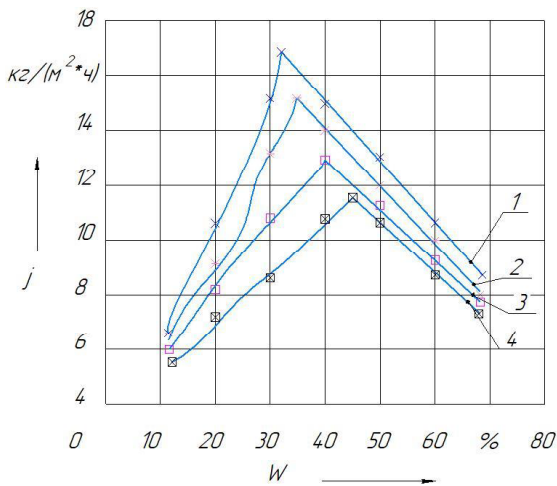


Рис. 3. Кривые интенсивности сушки свекловичного жома при различных давлениях пара в сушильной камере, кПа; 1 – 40; 2 – 60; 3 – 80; 4 – 100, при $v = 3$ м/с, $T_{II} = 413$ К, $q = 16$ кг/м²

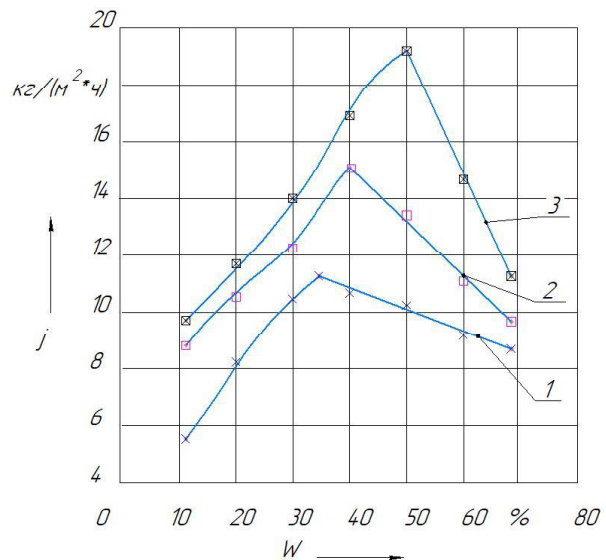


Рис. 4. Кривые интенсивности сушки свекловичного жома при различных порозностях виброкипящего слоя свекловичного жома; 1 – 0,42; 2 – 0,49; 3 – 0,56, при $v = 3$ м/с, $T_{II} = 413$ К, $P = 60$ кПа

Это определено глубиной проникновения колебаний в слой сыпучего материала $\delta_{сл}$ и получением однородного слоя [2]:

$$\delta_{сл} = \frac{2E}{SA^2\omega^3} \sqrt{1/\rho_{нас}}, \quad (6)$$

где E – мощность, передаваемая слою газораспределительной решеткой, Вт; S – площадь газораспределительной решеткой, м²; ω – угловая частота колебаний решетки, с⁻¹; $\rho_{нас}$ – насыпная плотность свекловичного жома, кг/м³.

Данная формула справедлива для виброкипящего слоя, не продуваемого потоком теплоносителя. Как отмечают некоторые исследователи [2], в случае продувки теплоносителя через слой материала глубина проникновения колебаний выше, чем без продувки. Это объясняется тем, что вибрация газораспределительной решетки вызывает колебание не только частиц твердой фазы, но и создает пульсации скорости оживающего агента, который распространяет эти колебания по всей высоте материала. Поэтому можно утверждать, что указанные значения амплитуды и частоты колебаний газораспределительной позволяют получить однородный виброкипящий

слой в момент подвода колебаний ($\tau_{\text{зуб}} = 3$ с) для удельных нагрузок $q_{\text{уд}} = 8 \dots 24$ кг/м². При продолжительности обработки менее 3 с имеет место недостаточно равномерное и полное перемешивание частиц жома, что приводит к снижению качества сушки, а при продолжительности этой обработки более 3 с имеет место чрезмерное истирание материала и неоправданно высокие энергозатраты.

В результате математической обработки экспериментальных данных получены критериальные зависимости, описывающие процесс теплообмена при сушке свекловичного жома с начальной влажностью 70 %.

Для периода постоянной скорости сушки зависимость получена в виде:

$$Nu = 15,3 Re^{0,28} \left(\frac{T_n}{T_m} \right)^{-0,67} \varepsilon^{1,85} \left(\frac{P_n}{P_{\text{атм}}} \right)^{-0,31} \quad (7)$$

Для периода убывающей скорости сушки:

$$Nu = 19,6 Re^{0,2} \left(\frac{T_n}{T_m} \right)^{-0,81} \varepsilon^{1,44} \left(\frac{P_n}{P_{\text{атм}}} \right)^{-0,45} \left(\frac{W}{W_{\text{кпл}}} \right)^{0,72} \quad (8)$$

Формулы (4) и (5) справедливы в следующих интервалах изменения режимных параметров: $T_n = 393 \dots 413$ К; $v_n = 3 \dots 5$ м/с; $q_{\text{уд}} = 8 \dots 24$ кг/м²; $p = 40 \dots 100$ кПа.

Отклонение результатов, полученных по формулам (7) и (8), от экспериментальных не превышает 17,5 %.

При сравнении уравнений (7) и (8) можно отметить, что влияние режимных параметров на теплообмен в периоде постоянной и убывающей скорости сушки практически не меняется, что подтверждает ранее сделанные выводы при анализе кинетических закономерностей и правильность выполненных математических расчетов.

Заключение. Таким образом, в результате математической обработки экспериментальных данных по сушке свекловичного жома перегретым паром пониженного давления в импульсном виброкипящем слое в условиях изменения гидродинамического и теплового режимов получены критериальные уравнения, адекватно описывающие процесс теплообмена в рассматриваемых интервалах изменения режимных параметров. Данные уравнения можно использовать при проектировании полупромышленных и промышленных сушильных установок для свекловичного жома при соблюдении гидродинамического, теплового подобия и с учетом масштабного перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гухман А. А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. М: ЛКИ, 2013. 328 с.
2. Членов В. А., Михайлов Н. В. Виброкипящий слой. М.: Наука, 1972. 346 с.
3. Shevtsov A., Drannikov A., Derkanosova A., Korotaeva A., Lobachova N. Study of the basic modes of drying of high-moisture disperse materials of vegetable origin // The 1st International Academic Conference «Science and Education in Australia, America and Eurasia: Fundamental and Applied Science». Australia, Melbourne. 23 June 2014. 173-176 s.
4. Konovalov V. I. Guest Editorial. Drying R&D needs: basic research in drying of capillary-porous materials // Drying Technology- an Intern. Journal. 2005. Vol. 23. No. 12. P. 2307–2311.
5. Гончаревич И. Ф., Фролов К. В. Теория вибрационной техники и технологии. М: Наука, 1981. 219 с.
6. Shevtsov A. A., Drannikov A. V., Derkanosova A. A., Muravev A. S., Kvasov A. V. Experimental and analytical study of the beet pulp drying process by overheated steam in active hydrodynamic conditions // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. № 12(Special Issue 1), P. 5754-5760.
7. Shevtsov A. A., Drannikov A. A., Derkanosova A. A., Borodovicyn A. M., Glebova I. V., Gurin A. G. Preparation and application of fodder vitamin additive choline chloride B₄ on the basis of dried beet pulp in premix composition // International Journal of Pharmaceutical Research & Allied Sciences. 2017. № 6(1), P. 217-226.
8. Дранников А. В., Литвинов Е. В., Полканов А. С., Костина Д. К. Выбор рациональных параметров процесса сушки свекловичного жома в импульсном виброкипящем слое пониженного давления // Вестник ВГУИТ. 2017. № 4, С. 24–32.
9. Шевцов А. А., Дранников А. В., Костина Е. В., Дерканосова А. А., Квасов А. В., Питькова Ю. А., Мочалова А. В. Установка для сушки дисперсных высоковлажных материалов. Патент РФ № 2603225 от 27.11.2016 г.

REFERENCES

1. Gukhman A. A. Primenenie teorii podobiya k issledovaniyu protsessov teplo-massoobmena. M: LKI, 2013. 328 s.
2. Chlenov V. A., Mikhaylov N. V. Vibrokiyashchiy sloy. M.: Nauka, 1972. 346 s.

3. Shevtsov A., Drannikov A., Derkanosova A., Korotaeva A., Lobachova N. Study of the basic modes of drying of high-moisture disperse materials of vegetable origin // The 1st International Academic Conference «Science and Education in Australia, America and Eurasia: Fundamental and Applied Science». Australia, Melbourn. 23 June 2014. 173-176 s.
4. Konovalov V. I. Guest Editorial. Drying R&D needs: basic research in drying of capillary-porous materials // Drying Technology- an Intern. Journal. 2005. Vol. 23. No. 12. P. 2307-2311.
5. Goncharevich I. F., Frolov K. V. Teoriya vibratsionnoy tekhniki i tekhnologii. M: Nauka, 1981. 219 s.
6. Shevtsov A. A., Drannikov A. V., Derkanosova A. A., Muravev A. S., Kvasov A. V. Experimental and analytical study of the beet pulp drying process by overheated steam in active hydrodynamic conditions // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. № 12(Special Issue 1), P. 5754-5760.
7. Shevtsov A. A., Drannikov A. A., Derkanosova A. A., Borodovicyn A. M., Glebova I. V., Gurin A. G. Preparation and application of fodder vitamin additive choline chloride B4 on the basis of dried beet pulp in premix composition // International Journal of Pharmaceutical Research & Allied Sciences. 2017. № 6(1), P. 217-226.
8. Drannikov A. V., Litvinov E. V., Polkanov A. S., Kostina D. K. Vybora ratsional'nykh parametrov protsessa sushki sveklovichnogo zhoma v impul'snom vibrokipyashchem sloe ponizhennogo davleniya // Vestnik VGUIT. 2017. № 4, S. 24 – 32.
9. Shevtsov A. A., Drannikov A. V., Kostina E. V., Derkanosova A. A., Kvasov A. V., Pit'kova Yu. A., Mochalova A. V. Ustanovka dlya sushki dispersnykh vysokovlazhnykh materialov. Patent RF № 2603225 ot 27.11.2016 g.

ОБ АВТОРАХ

Дранныков Алексей Викторович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», 8(908)130-62-25, drannikov@list.ru

Drannikov Alexey Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh state university of engineering technologies, 8(908)130-62-25, drannikov@list.ru

Квасов Александр Вячеславович, экстерн кафедры «Машины и аппараты пищевых производств», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», 8(950)755-03-44, evgeniya.kostina.74@mail.ru

Kvasov Aleksandr Vyacheslavovich, ekstern of the Department "Machines and apparatuses of food productions", of the "Voronezh state university of engineering technologies", 8(950)755-03-44, evgeniya.kostina.74@mail.ru

Полканов Андрей Сергеевич, магистрант кафедры «Машины и аппараты пищевых производств», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», 8(908)146-47-16, andrej.polkanov.96@mail.ru

Polkanov Andrey Sergeevich, master's student of the Department "Machines and apparatus of food production", Voronezh state university of engineering technologies, 8(908)146-47-16, andrej.polkanov.96@mail.ru

Костина Дарья Константиновна, студент кафедры «Машины и аппараты пищевых производств», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», 8(910)245-14-23, kostina.dasha.2111@mail.ru

Kostina Daria Konstantinovna, student of the Department "Machines and apparatus of food production", Voronezh state university of engineering technologies, 8(910)245-14-23, kostina.dasha.2111@mail.ru

Дата поступления в редакцию: 22.02.2019 г.

После рецензирования: 04.03.2019 г.

Дата принятия к публикации: 14.05.2019 г.