

## Исследование процесса сушки сельдерея методом псевдооживления

Фролов Д.И., Полосина Е.И.

**Аннотация.** В статье проведены исследования процесса сушки нарезанного сельдерея методом псевдооживления. При этом использовалась теоретическая модель сушки нарезанных овощей в первом периоде и упрощенная модель во втором периоде. Проверка этих моделей и определение области их применения показали, что наиболее важным в обмене воды в этом процессе является внутренний обмен массы и тепла. Их динамика зависит от начальной скорости сушки в первый период. Предложена новая модель сушки в кипящем слое и проверена на нарезке сельдерея.

**Ключевые слова:** псевдооживление, теоретическая модель, сельдерей, сушка.

**Для цитирования:** Фролов Д.И., Полосина Е.И. Исследование процесса сушки сельдерея методом псевдооживления // Инновационная техника и технология. 2023. Т. 10. № 3. С. 32–37.

## Investigation of celery drying process by fluidisation method

Frolov D.I., Polosina E.I.

**Abstract.** The article studies the process of drying chopped celery using the fluidization method. In this case, a theoretical model of drying chopped vegetables was used in the first period and a simplified model in the second period. Testing these models and determining the scope of their application showed that the most important in the exchange of water in this process is the internal exchange of mass and heat. Their dynamics depend on the initial drying speed in the first period. A new model of fluidized bed drying is proposed and tested on celery slicing.

**Keywords:** fluidization, theoretical model, celery, drying.

**For citation:** Frolov D.I., Polosina E.I. Investigation of celery drying process by fluidisation method. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2023. Vol. 10. No. 3. pp. 32–37. (In Russ.).

### Введение

Испытания сушки нарезанного сельдерея методом псевдооживления явились результатом исследования новых методов сушки, которые могут обеспечить получение сухой массы высокого качества. При псевдооживленной сушке материал в виде твердых частиц сушится конвективным способом, за счет закрутки в потоке. Такое состояние обеспечивает большое развитие поверхности высушенного продукта, что, в свою очередь, облегчает обмен теплотой и массой между этим продуктом и фактором сушки. Сушка в потоке горячего воздуха обеспечивает гораздо более благоприятные условия тепло- и массообмена, чем в устойчивом слое [1, 2]. Метод сушки в псевдооживленном слое является важным методом среди современных способов сушки, поскольку его конкурентоспособность по отношению к другим заключается в наилучшем соотношении

получаемой интенсивности сушки к затратам на прокачку газа [3]. Его применяют в основном для сушки материалов с мелкими частицами, таких как бумага, кожа, пасты, суспензии и растворы, распыляемые на псевдооживленном инертном слое [4, 5, 6]. Однако было опубликовано мало статей, посвященных сушке материалов с крупными частицами, таких как нарезанные овощи, в частности нарезанный сельдерей, и не существует моделей для этого процесса.

Очень большое значение поверхностной скорости осушающего воздушного потока является характерным параметром псевдооживляющей сушки. Она от десятков до нескольких сотен раз превышает скорость потока через устойчивый слой и, например, для частиц размером 10 мм составляет от 1 до 6 м/сек [7]. Столь интенсивный поток воздуха вызывает быстрое и значительное снижение концентрации водяного пара в слое и в результате

можно считать, что только влажный и пересушенный воздух оказывает влияние на теплообмен в слое. Измерения температуры псевдоожижающего воздуха, выходящего из слоя, показывают снижение всего на несколько градусов, что означает, что частицы высушиваются практически при той же температуре, что и коэффициент сушки. Таким образом, псевдооживленная сушка частиц протекает аналогично конвективной сушке в тонком слое. Это означает, что математические модели, используемые для сушки в тонком слое, например уравнения кинетики, могут быть применены к сушке в псевдоожиженном слое отдельных твердых тел, свободно движущихся в потоке осушающего газа.

### Объекты и методы исследования

Опытным путем сделан вывод, что нарезанный сельдерей, представляющий собой материал с высоким исходным содержанием воды, при сушке псевдоожижением высыхает в несколько раз быстрее, чем в твердом слое, при той же температуре сушильного воздуха. Можно сделать вывод, что в начале этого процесса имеют место существенные и даже доминирующие условия переноса частиц воды с поверхности высушенной массы через приграничный слой воздуха. В конце сушки решающее значение для процесса имеет только внутренняя диффузия частиц воды (пара) к твердой поверхности. Однако в реальности оба процесса сосуществуют, не исключая друг друга, и показать их эмпирически достаточно сложно. Если предположить, что указанные процессы доминируют как альтернатив-

ные, то легко построить модель кинетических уравнений так называемого первого или второго периода сушки с сохранением непрерывности модели для склеенной функции.

Исследователи высказали предположение, что в начале сушки кинетическая модель конвективной сушки твердых масс на первом этапе сушки, включая конвекцию, может быть использована в качестве модели изменения содержания воды в очень влажных частицах, таких как нарезанные овощи в порционной псевдоожижающей сушильной машине.

$$u_1(t) = u_0 \left[ \frac{1}{1-b} \left( 1 - \frac{1-b}{Nu_0} k_0 t \right)^N - \frac{b}{1-b} \right] \quad (1)$$

$b$  - коэффициент усадки при высыхании;

$k_0$  - коэффициент скорости сушки за начальный период (кг/(кг мин));

$N$  - коэффициент, указывающий вид усадки;

$u$  - среднее содержание воды в высыхающих частицах (кг/кг);

$u_0$  - начальное, среднее содержание воды (кг/кг);

$t$  - время сушки (мин).

Коэффициенты уравнения  $b$ ,  $k_0$  и  $N$  могут быть определены эмпирически на основе подходящих теоретических зависимостей.

Уравнение (1) было проверено на основе измерений сушки в псевдоожиженном слое черенков сельдерея, для которого  $N = 3$ . Согласованность расчетов получена для измерений в диапазоне содержания воды не менее 3 кг/кг с относительной погрешностью не более 10%. Бурный рост отно-

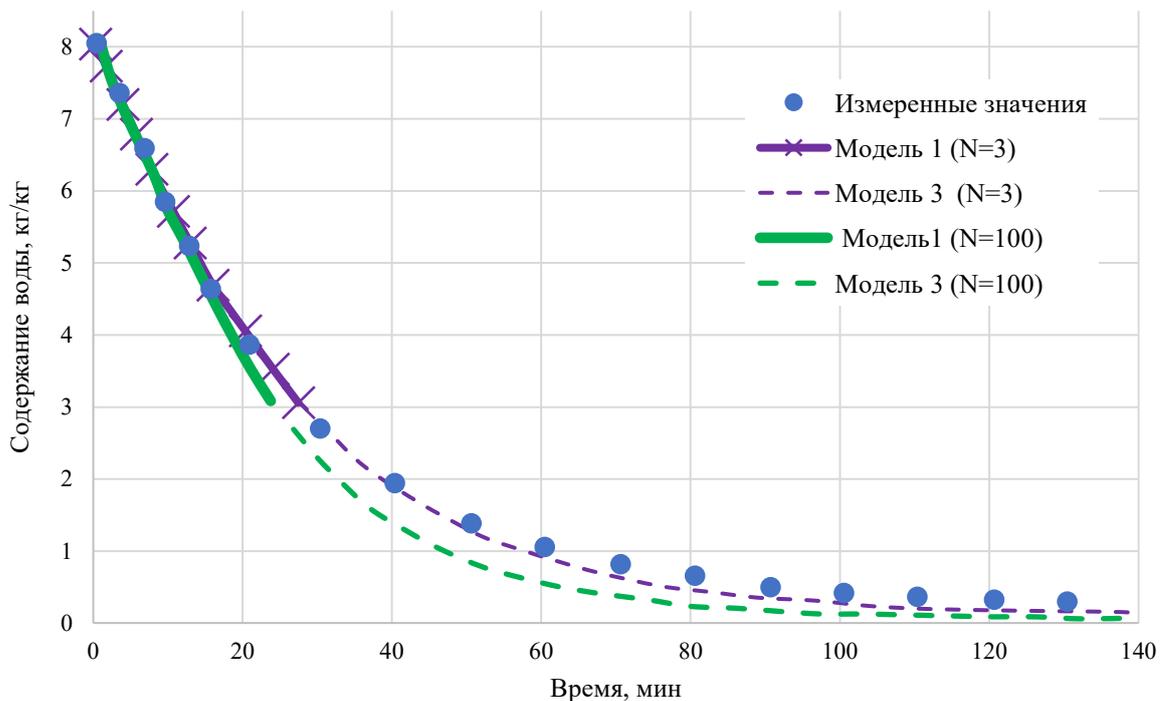


Рис. 1. Сравнение измерений и расчетов для модели (1) и (3) содержания воды в образцах сельдерея, высушенного при 60°C, если  $u_{kr} = 3$  кг/кг, при различных значениях  $N$ .

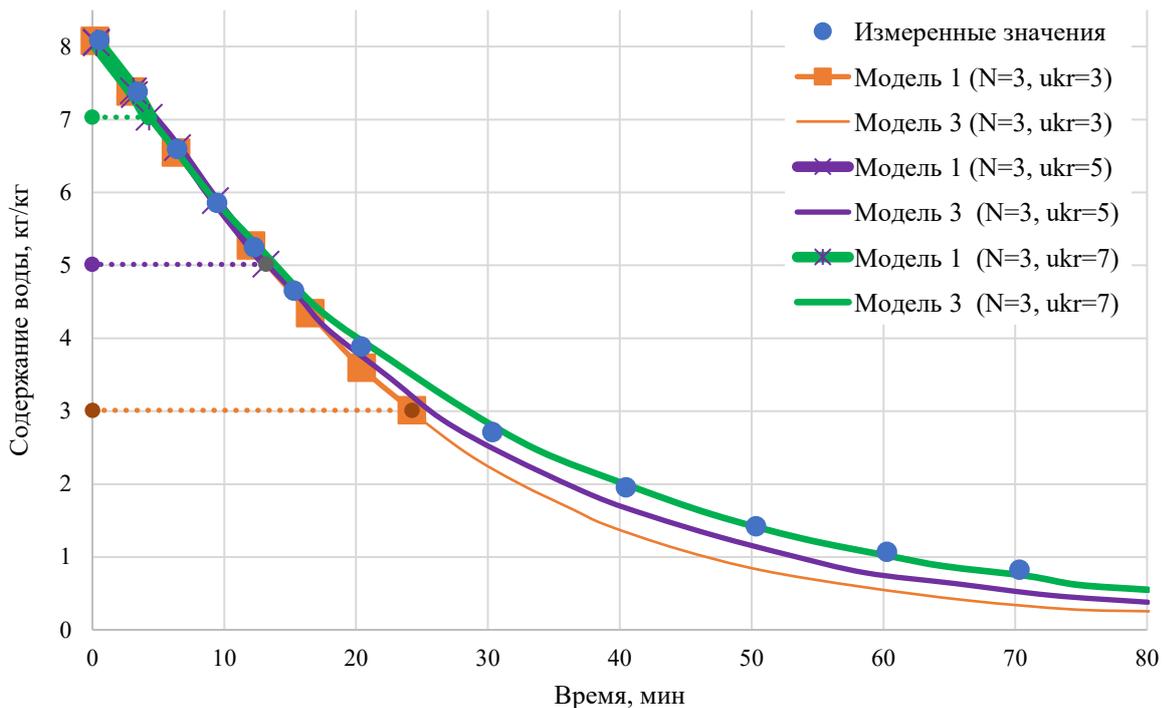


Рис. 2. Сравнение результатов измерений и расчетов для модели (1) и (3) содержания воды в кубиках сельдерея, 60°C.

сительной ошибки для модели (1) показывает, что другие правила начинают определять процесс за пределами указанного диапазона - в твердом состоянии начинает преобладать внутренняя диффузия воды.

Начиная с критического времени  $t_{kr}$ , для которого  $u(t > t_{kr}) < u_{kr}$ , процесс можно моделировать с помощью дифференциального уравнения диффузии при заданных начально-граничных условиях или, в обоснованных случаях, из его упрощенного решения. Чаще всего используют уравнение среднего содержания воды в высушенном продукте, которое означает:

$$u_2(t) = u_e + (u_{kr} - u_e)e^{-Kt} \quad (2)$$

$u_{kr}$  - критическое содержание воды (кг/кг);

$u_e$  - равновесное содержания воды (кг/кг);

$K$  - коэффициент скорости сушки во втором периоде (л/мин).

Согласно теории, использование модели (2) помогает создать модель дальнейшей сушки. Однако это требует введения скорректированного времени сушки  $(t - t_{kr})$ . Тогда уравнение (2) будет выглядеть следующим образом:

$$u_2(t - t_{kr}) = u_e + (u_{kr} - u_e)e^{K(t-t_{kr})} \quad (3)$$

Ход сушки требует, чтобы его модель представляла собой непрерывную и дифференциальную функцию. Это условие для склеенной модели означает, что в точке  $(t = t_{kr})$  перехода от модельной структуры (1) к модельной структуре (2) должно быть равное количество воды и скорость высыхания, определенные из этих моделей, а это означает:

$$k_0 \left( 1 - \frac{1-b}{Nu_0} k_0 t_{kr} \right)^{N-1} = K(u_{kr} - u_e) \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет рассчитать значение коэффициента  $K$  после перехода с использованием (1) из следующего:

$$K = \frac{k_0}{u_{kr} - u_e} \left( (1-b) \frac{u_{kr}}{u_0} + b \right)^{\frac{N-1}{N}} \quad (5)$$

Анализ измерений содержания воды и температуры сушки продукта позволяет показать диапазон, в пределах которого можно найти критическое содержание воды  $u_{kr}$ . Можно сказать, что значение  $u_{kr}$  находится в диффузном наборе содержания воды, относящемся к переходному периоду времени.

Математическая модель сушки овощной нарезки в кипящем слое составлена из системы уравнений (1) и (3). Данная система позволяет провести компьютерное моделирование сушки овощной нарезки перед экспериментом, если известны только числовые значения теплофизических и геометрических коэффициентов в этой модели и известно критическое содержание воды.

### Результаты и их обсуждение

Проверка предложенной модели проводилась на основе экспериментов, проведенных в лабораторной сушилке с псевдооживлением. Измерения псевдооживляющей сушки проводились для сельдерея, нарезанного в виде кубиков диаметром 10 мм и одинакового содержания воды. Зафиксировано изменение массы реза в зависимости от времени и температуры сушащего воздуха в диапазоне исход-

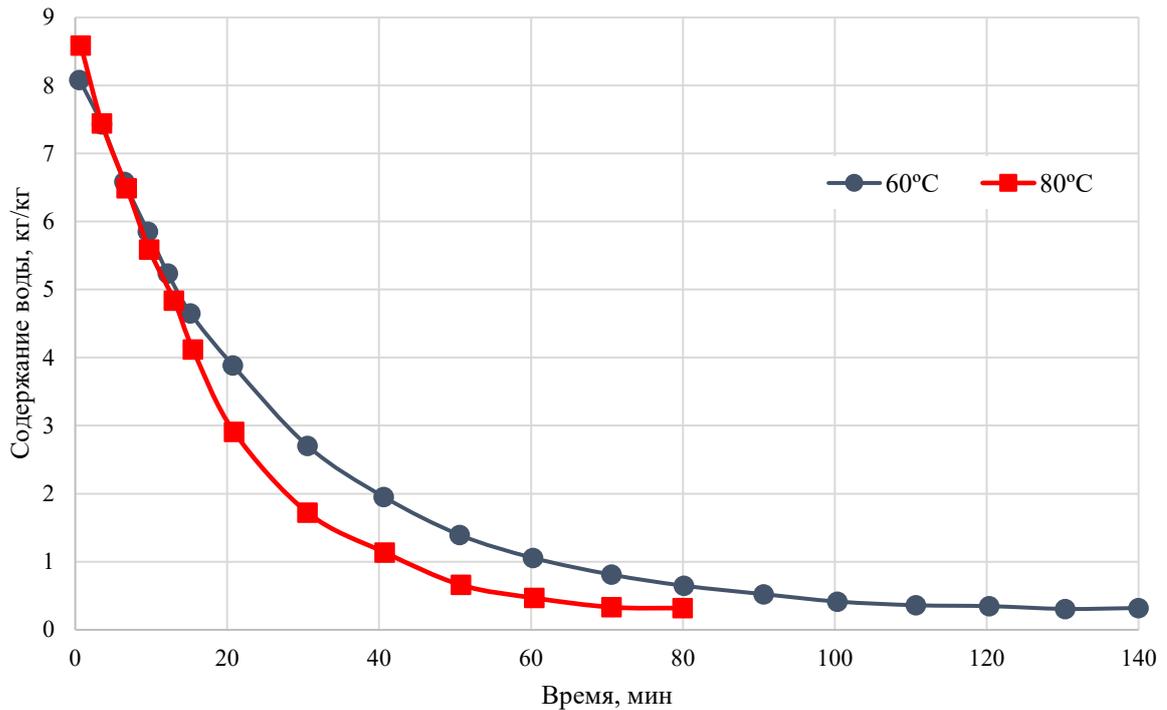


Рис. 3. Измерения и расчеты для модели (6) сушки сельдерея в псевдооживленном слое с высотой покоя 12 см, на воздухе 60°C и 80°C.

ной влажности до близкой к равновесной. Измерения проводились для слоев исходной высоты 4, 8, 12, 16 и 20 см, осушенных воздухом температурой 40, 50, 60, 70, 80°C при скорости потока 4 - 4,5 м/с. Массу высушенного вещества рассчитывали для каждого образца методом высушивания. Эмпирическим путем определяли значение коэффициента  $b$  для усадки при сушке ( $b = 0,08$ ), а также определяли эмпирическую зависимость начальной скорости сушки  $k_0$  от исходного содержания воды (в высушенном продукте)  $u_0 = 8$  кг/кг,  $k_0(t_p, \text{ч}) = (0,0085 - 0,0016 \ln h)t + (0,0395 - 0,0098 \ln h)$ , в пределах  $t_p \in (40 - 80^\circ\text{C})$  и  $h \in (4 - 20 \text{ см})$ .

Совокупность уравнений (1) и (3) за счет использования формулы (5) во втором периоде в качестве коэффициента  $K$  для скорости сушки представляет собой модель всего процесса в виде склеенной, но непрерывной и дифференцируемой во всем диапазоне, функции.

Близость расчетов в этой модели очень сильно зависит от априорно оцененного критического значения влагосодержания. Если принять, что критическое содержание воды составляет примерно 3 кг/кг, то точность моделирования процесса сушки будет неудовлетворительной, о чем свидетельствуют значения относительной и абсолютной ошибок для обеих моделей, построенных по аппроксимационной формуле (рис. 1). Чем выше коэффициент  $N$ , тем выше близость модели. Увеличение его значения выше 100 уменьшает ошибки в меньшей степени, и в то же время при  $N > 3$  его трудно интерпретировать физически. Если  $N > 3$ , то кубические частицы должны характеризоваться меньшим изменением поверхности, чем изотропные (сохра-

няющие гладкую поверхность). Поэтому диапазон влагосодержания, в котором модель для первого периода сушки принимается как верифицированная, ограничивается  $N$ , равным не более 3.

На рисунке 2 показаны результаты проверки модели в предположении, что критическое содержание воды  $u_{kr}$  составляет примерно 3, 5 и 7 кг/кг и  $N=3$ .

Анализ проведенных расчетов, представленных на рис. 2, позволяет сделать вывод о том, что модель (1) подтверждается для изменения содержания воды в меньшей степени, чем предполагалось ранее. Это означает, что внутренняя диффузия решает вопросы массообмена гораздо быстрее, чем естественная или принудительная конвекция (при меньших значениях расхода воздуха, чем при псевдооживлении). Увеличивая значения критического влагосодержания, можно получить меньшие значения ошибок для обеих моделей. Конечным является инертное влагосодержание. Если принять, что  $u_{kr} = u_0$  и  $t_{kr} = 0$ , то уравнение (3) имеет следующий вид:

$$u(t) = u_r + (u_0 - u_r) \exp\left(-\frac{k_0}{u_0 - u_r} \cdot t\right) \quad (6)$$

Коэффициент  $K$  скорости сушки во втором периоде можно определить на основе коэффициента  $k_0$  начальной скорости сушки в первом периоде, и тогда коэффициент  $N$  не имеет значения.

На рис. 3 показано сравнение измерений и расчетов для модели (6) сушки при 60°C и 80°C слоя с высотой покоя 12 см.

Результаты, аналогичные показанным на рисунке 3, были получены для тестируемого диапазона температур и высоты покоя слоя для среза-

сельдерея. Абсолютные погрешности не превышают  $\pm 0,3$  величины во всем диапазоне изменения содержания воды, а относительная ошибка не превышает 10% при содержании воды и выше 1 кг/кг. Проведенный выше анализ позволяет сделать вывод о положительной верификации модели второго периода сушки в виде уравнения (6) при псевдооживленной сушке сельдерея.

### Выводы

Эмпирическая и логическая проверка второго периода сушки показывает, что при сушке сельде-

рея в псевдооживленном слое существенное влияние на содержание воды оказывает внутренняя диффузия воды. Существенное влияние на коэффициент скорости сушки в модели второго периода оказывает внешнее сопротивление сушке, которое может оказать существенное влияние на массообмен при резке сельдерея только на начальном этапе этого псевдооживленного процесса. Коэффициент  $K$  скорости сушки во втором периоде прямо пропорционален коэффициенту  $k_0$  для начальной скорости сушки и обратно пропорционален разности исходного и равновесного содержания воды.

### Литература

- [1] Lewicki P. P. Water as the determinant of food engineering properties. A review // Journal of food engineering. – 2004. – Т. 61. – №. 4. – С. 483-495.
- [2] Dantas D. et al. Influence of spray drying conditions on the properties of avocado powder drink // Food chemistry. – 2018. – Т. 266. – С. 284-291.
- [3] Banga J. R., Singh R. P. Optimization of air drying of foods // Journal of Food Engineering. – 1994. – Т. 23. – №. 2. – С. 189-211.
- [4] Гетия С. И., Кочетов О. С. Экологическая безопасность процессов распылительной сушки // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Серия: Машиностроение. – 2011. – №. 37. – С. 109-114.
- [5] Бородина Е. С., Кочетов О. С. Повышение эффективности процессов сушки путем применения физических полей // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. – 2014. – №. 10. – С. 155-160.
- [6] Сажин Б. С. и др. Исследование процесса сушки диспергированных материалов с применением акустических полей // Успехи в химии и химической технологии. – 2009. – Т. 23. – №. 8 (101). – С. 113-122.
- [7] Jin H. et al. Heat and mass transfer performance of non-spherical wet particles in a fluidized bed dryer // Applied Thermal Engineering. – 2023. – С. 121780.

### References

- [1] Lewicki P. P. Water as the determinant of food engineering properties. A review // Journal of food engineering. – 2004. – Т. 61. – No. 4. – pp. 483-495.
- [2] Dantas D. et al. Influence of spray drying conditions on the properties of avocado powder drink // Food chemistry. – 2018. – Т. 266. – P. 284-291.
- [3] Banga J. R., Singh R. P. Optimization of air drying of foods // Journal of Food Engineering. – 1994. – Т. 23. – No. 2. – pp. 189-211.
- [4] Getia S.I., Kochetov O.S. Environmental safety of spray drying processes // Bulletin of the Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics. Series: Mechanical engineering. – 2011. – No. 37. – pp. 109-114.
- [5] Borodina E. S., Kochetov O. S. Increasing the efficiency of drying processes by using physical fields // Fundamental and applied research: problems and results. – 2014. – No. 10. – pp. 155-160.
- [6] Sazhin B. S. et al. Study of the drying process of dispersed materials using acoustic fields // Advances in chemistry and chemical technology. – 2009. – Т. 23. – No. 8 (101). – pp. 113-122.
- [7] Jin H. et al. Heat and mass transfer performance of non-spherical wet particles in a fluidized bed dryer // Applied Thermal Engineering. – 2023. – P. 121780.

## Сведения об авторах

## Information about the authors

<p><b>Фролов Дмитрий Иванович</b> кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 <b>Тел.:</b> +7(937) 408-35-28 <b>E-mail:</b> surr@bk.ru</p>	<p><b>Frolov Dmitriy Ivanovich</b> PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University <b>Phone:</b> +7(937) 408-35-28 <b>E-mail:</b> surr@bk.ru</p>
<p><b>Полосина Елизавета Игоревна</b> магистрант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11</p>	<p><b>Polosina Elizaveta Igorevna</b> undergraduate of the department «Food productions» Penza State Technological University</p>