

**Аделина Альбертовна Нугманова**

Астраханский государственный технический университет, аспирант кафедры технологических машин и оборудования, Астрахань, Россия, e-mail: albert909@yandex.ru

**Игорь Юрьевич Алексанян**

Астраханский государственный технический университет, профессор кафедры технологических машин и оборудования, доктор технических наук, профессор, Астрахань, Россия, e-mail: 16081960igor@gmail.com

**Юрий Александрович Максименко**

Астраханский государственный технический университет, заведующий кафедрой технологических машин и оборудования, доктор технических наук, доцент, Астрахань, Россия, e-mail: amxs1@yandex.ru

**Олег Александрович Петровичев**

Астраханский государственный технический университет, доцент кафедры технологических машин и оборудования, кандидат технических наук, Астрахань, Россия, e-mail: albert909@yandex.ru

**Вера Николаевна Лысова**

Астраханский государственный технический университет, доцент кафедры технологических машин и оборудования, кандидат технических наук, доцент, Астрахань, Россия, e-mail: albert909@yandex.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА СВОЙСТВ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
ГРАНУЛИРОВАННОЙ КЛЕЙКОВИНЫ КАК ОБЪЕКТА СУШКИ**

*Цель исследования – определение комплекса свойств и морфометрический анализ гранулированной клейковины как объекта сушки для последующего выбора предпочтительных метода и режимов влагоудаления, а также математического моделирования данной процедуры. Задачи исследования: проведение сравнительного анализа существующих способов обезвоживания подобных материалов; проведение морфометрического анализа гранулированного продукта; получение информации о структурно-механических и теплофизических параметрах клейковинных гранул, а также теплотехнических параметров их взаимодействия с оживающим агентом. Объектом исследования послужили замороженные, частично обезвоженные гранулы пшеничной клейковины с поверхностной сухой корочкой для уменьшения адгезии между гранулами. Проведены оценка гранулометрического состава диспергированной клейковины, исследования закономерностей варьирования структурно-механических и теплофизических характеристик клейковинных гранул, а также теплотехнических параметров их взаимодействия с оживающим агентом для выбора рациональных режимных параметров их сушки в псевдооживленном состоянии. Осуществлен морфометрический анализ, теоретически и опытным путем найдены теплофизические параметры и физическая плотность гранул пшеничной клейковины, кинетические параметры обмена тепловой энергией на границе фазового раздела в заданных пределах варьирования влажности и параметров сушильного агента, которые обуславливают выбор рационального способа обезвоживания изучаемого гранулированного продукта. Установлено, что для исследуемого продукта, которым является замороженная и подсушенная до влажности 0,474 кг/кг гранула, наиболее приемлемым способом сушки является конвективный, при этом влагоудаление из гранулированного материала должно осуществляться при его нахождении в псевдооживленном состоянии.*

**Ключевые слова:** клейковина, гранулы, морфометрический анализ, плотность, теплофизические характеристики, коэффициент теплоотдачи, сушка.

**Adelina A. Nugmanova**

Astrakhan State Technical University, post-graduate student at the Department of Technological Machinery and Equipment, Astrakhan, Russia, e-mail: albert909@yandex.ru

**Igor Yu. Aleksanyan**

Astrakhan State Technical University, professor at the Department of Technological Machinery and Equipment, Astrakhan, Russia, e-mail: 16081960igor@gmail.com

**Yuri A. Maksimenko**

Astrakhan State Technical University, head of the Department of Technological Machinery and Equipment, doctor of technical sciences, associate professor, Astrakhan, Russia, e-mail: amxs1@yandex.ru

**Oleg A. Petrovichev**

Astrakhan State Technical University, associate professor at the Department of Technological Machinery and Equipment, candidate of technical sciences, Astrakhan, Russia, e-mail: albert909@yandex.ru

**Vera N. Lysova**

Astrakhan State Technical University, associate professor at the Department of Technological Machinery and Equipment, candidate of technical sciences, Astrakhan, Russia, e-mail: albert909@yandex.ru

### PROPERTIES COMPLEX STUDY AND MORPHOMETRIC ANALYSIS OF GRANULATED GLUTEN AS A DRYING OBJECT

*The aim of the study is to determine the complex of properties and morphometric analysis of granular gluten as an object of drying for the subsequent selection of the preferred method and modes of dehumidification, as well as mathematical modeling of this procedure. Research objectives: comparative analysis of existing methods of dehydration of such materials; morphometric analysis of the granular product; obtaining information about the structural-mechanical and thermophysical parameters of gluten granules, as well as the heat engineering parameters of their interaction with the fluidizing agent. The object of the study was frozen, partially dehydrated granules of wheat gluten with a surface dry crust to reduce adhesion between the granules. The study conducted the evaluation of the granulometric composition of dispersed gluten, the study of the regularities of variation in the structural-mechanical and thermophysical characteristics of gluten granules, as well as the thermal parameters of their interaction with the fluidizing agent for the selection of rational regime parameters of their drying in a fluidized state. Research carried out morphometric analysis, theoretically and experimentally found thermophysical parameters and physical density of wheat gluten granules, kinetic parameters of thermal energy exchange at the phase interface within the specified range of moisture variation and drying agent parameters, which determine the choice of a rational method for dehydration of the studied granular product. It is established that for the test product, which is a granule frozen and dried to a moisture content of 0.474 kg / kg, the most acceptable drying method is convective, while moisture removal from the granular material should be carried out while it is in a fluidized state.*

**Keywords:** *gluten, granules, morphometric analysis, density, thermophysical characteristics, heat transfer coefficient, drying.*

**Введение.** Важным компонентом, вырабатываемым из пшеничного зерна, служит клейковина, используемая как улучшитель пекарных параметров муки для ее белкового обогащения, в виде природного наполнителя, стабилизирующей и связующей субстанции. Выбор рациональных подходов к комплексной обработке зерна при извлечении белкового компонента – клейковины и крахмала является актуальной задачей на множестве предприятий агропромышленного комплекса.

Предприятия, вырабатывающие клейковину, стремятся обоснованно совершенствовать технологию ее получения [1]. К примеру, следует обратить особое внимание на трудности при ее сушке без деструкции белковых компонентов для сохранности в ней нативных параметров, в частности способности удерживать воду – не меньше 150 % (т. е. 1,5 г воды на 1 г клейковины), цветности – от светло-желтой до светло-коричневой гаммы [2]. В процессе изучения операции обезвоживания и совершенствования

технологий сушки и их технического обеспечения важно рационально выбрать и проанализировать влияние факторов на длительность процедуры влагоудаления для разработки его оптимальных режимов.

Системный анализ известных технологий сухой пшеничной клейковины (СПК) приводит к выводу о том, что с целью роста эффективности процедуры удаления влаги и ее регулировки, исключая применение вспомогательных ингредиентов, таких как собственно СПК и мука, перспективной представляется вакуумная самопроизвольная заморозка нативной клейковины в виде гранул перед обезвоживанием [3–5]. Это приводит к частичному высвобождению воды в связанном состоянии по причине роста ее объема при заморозке и деструкции замкнутых пор, капилляров, клеток и т. п., и, кроме того, уменьшения адгезионной связи между диспергированными клейковинными частями. К тому же целесообразно в вакуумной камере произвести предварительную сублимационную подсушку замороженного гранулированного продукта при радиационном энергоподводе до появления твердой корочки поверхности гранул, что обуславливает существенное уменьшение адгезионного сцепления между ними. Далее гранулированный материал выводится из вакуумного отсека и окончательное обезвоживание осуществляется для снижения длительности и энергоемкости операции традиционным путем, в частности сушкой материала в псевдооживленном состоянии.

**Цель исследования:** определение комплекса свойств и морфометрический анализ гранулированной клейковины как объекта сушки для последующего выбора предпочтительных методов и режимов влагоудаления, а также математического моделирования данной процедуры.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд **задач:** проведение сравнительного анализа существующих способов обезвоживания подобных материалов; проведение морфометрического анализа гранулированного продукта; получение информации о структурно-механических и теплофизических параметрах клейковинных гранул, а также теплотехнических параметров их взаимодействия с оживающим агентом.

**Объект и методы исследования.** Объектом исследования послужили замороженные гранулы пшеничной клейковины с поверхностной сухой корочкой в процессе обезвоживания. Ис-

следуемые гранулы вырабатываются в виде малоразмерных замороженных цилиндров с подсушенной антиадгезионной поверхностной корочкой для минимизации, как отмечалось выше, агломерации гранул в общей массе, как при хранении, так и в процессах их дальнейшей переработки, например транспортировки и сушки [3]. В случае выбора варианта получения продукта в виде гранул для последующей их сушки целесообразно провести опытные исследования по выработке гранулированного замороженного продукта в заданных габаритах, которые можно осуществить в том числе и морфометрической оценкой исходных и сухих образцов в зависимости от режимов их формообразования, что дает возможность выбрать не только приемлемый размер, но и рациональные режимы гранулирования. Таким образом, морфометрическая оценка полученных клейковинных гранул и их фотографии позволят определить возможность обеспечения заданного диаметра малого размера (при фиксированном диаметре отверстий фильерного диска 2; 3; 4 и 5 мм) и длину жгута без его разрыва под собственным весом для проведения замораживания штранга и образования на нем сухой, малоадгезионной корочки.

В процессе конвективной сушки клейковинных гранул, прошедших этапы формования, подсушки и гранулирования, получается сухой конечный продукт в виде мелких обезвоженных частиц, причем плотностные параметры исходного, промежуточного и итогового продуктов варьируются по причине изменения доли влаги в них. При этом достаточно опытным путем найти физическую плотность влажной гранулы и конечного сухого продукта [6–8], определить величину текущей плотности с приемлемой точностью можно путем линейной аппроксимации интервала между ее крайними величинами.

Что касается значений истинной плотности объекта исследования, которые необходимы для расчета коэффициента теплопроводности, то ее изменение от исходного сырья с начальной влажностью до высушенного продукта с конечной влажностью можно получить, применяя правило аддитивности. Точкой отсчета может служить значение плотности исходной влажной гранулы  $\rho_{исх}$ , для расчета также понадобится значение плотности сухого остатка  $\rho_{с.о.}$ , которое можно найти из следующей формулы:

$$\rho_{c.o.} = \frac{1 - W/100}{1/\rho_{исх} - \frac{W/100}{\rho_B}} \quad (1)$$

где  $W$  – влажность исходного сырья, %;  $\rho_B = 1000$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Теплофизические характеристики (ТФХ) гранулированного объекта изучения в пределах варьирования температур ( $T$ ) от 274 до 363 °К практически неизменны, и по этой причине в данных пределах достаточно осуществить опытное исследование по определению величин коэффициента теплопроводности  $\lambda$  (Вт/(м·К)), температуропроводности  $a$  (м<sup>2</sup>/с) и удельной теплоемкости  $c_M$  (Дж/(кг·К)) для изучаемой субстанции известным зондовым экспресс-методом [9, 10].

В итоге осуществления опытной серии по определению ТФХ клейковинных гранул при температурах выше 274 °К при 5-кратном дублировании опытов были определены величины, опираясь на которые, по методу, описанному в

[9, 10], производился расчет необходимых характеристик. В связи с тем, что применяемый зондовый метод не применим для изучения твердых субстанций, определение закономерностей варьирования ТФХ при переменной влажности в широких пределах резонно осуществить посредством их расчета по известным зависимостям [11, 12].

Поскольку удельная теплоемкость как параметр подчиняется закону аддитивности, то ее можно определить для любой текущей доли влаги исходя из величин теплоемкостей воды  $c_{воды}$  и клейковины  $c_M$  при заданной влажности  $W$ , вычислив теплоемкость абсолютно сухого вещества  $c_{c.o.}$ , которую находим следующим образом:

$$c_{c.o.} = \frac{c_M - c_{воды} \cdot W}{C}, \quad (2)$$

где  $C$  – концентрация сухого остатка в образце,  $C = 1 - W$ .

Величина  $\lambda$  не подчиняется правилу аддитивности, и по этой причине для определения данного параметра можно применить эмпирическую формулу (3) А.С. Гинзбурга [11]. Здесь обобщенный для овощного сырья параметриче-

ский коэффициент  $B$  надо скорректировать для пшеничной клейковины и изучаемого гранулированного материала, введя поправочный коэффициент  $B_{пон}$ , найденный посредством корреляции опытной характеристики и рассчитанный по формуле А.С. Гинзбурга при равнозначных долях воды.

$$\lambda = \frac{\rho_\phi}{\rho_{и}} (A - B(100 - W)) + C \left(1 - \frac{\rho_\phi}{\rho_{и}}\right), \quad (3)$$

где  $A = 0,47$ ;  $B, C = 0,25$  – эмпирические коэффициенты.

Величину  $a$  в определенных пределах влажности материала можно найти по выражению  $a(W) = \frac{\lambda(W)}{c(W)\rho(W)}$ , зная функциональные зависимости  $\lambda = f(W)$ ,  $c = f(W)$  и  $\rho_\phi = f(W)$  для заданных пределов варьирования  $T$ .

Основные задачи выявления рациональных режимных параметров обезвоживания гранулированной клейковины и габаритов аппаратов для сушки определяют соотношение расходов продукта и теплоносителя при определенных условиях поведения его слоя, опираясь на уравнения материального и теплоэнергетического балансов, кинетические и статические

закономерности, обусловленные 3 началами термодинамики [13, 14]. В данных соотношениях присутствуют кинетические параметры теплообмена  $\alpha$  и массообмена  $\beta$ , зная которые можно найти численные величины перенесенной тепловой энергии и вещества при термообработке, охлаждении и влагоудалении из объекта обработки. Несмотря на множество отечественных и зарубежных исследований, данные задачи до настоящего момента однозначно не решены [13–16]. Минимальные величины  $\alpha$  наблюдаются при теплообмене с газовыми средами:  $\alpha = 10 - 50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), больше с жидкостными, в частности с водной, средами –  $\alpha = 200 - 10000$ . Это говорит в пользу того, что нагревание воздушной средой, которое исполь-

зуются в данном исследовании, мало интенсивно, на что надо обратить внимание при исследовании процедур нагревания и влагоудаления из исследуемых гранул.

Теплообмен между исследуемой гранулой и сушильным агентом при его движении вдоль поверхности объекта сушки представляется сложной процедурой, обусловленной формой и габаритами объекта изучения, порозностью

слоя, параметрами сушильного агента, его  $T$ ,  $T$  подложки и т. д. С целью вычисления  $\alpha$  в стационарных режимах перемещения воздушной среды вдоль поверхности неподвижного слоя продукта с малой  $\lambda$  в пределах 0,13–1,7 Вт/(м·К), опираясь на результаты ряда исследователей [13, 17], было предложено следующее соотношение:

$$Nu = 0,123Re^{0,83}, \quad (4)$$

где  $Nu = \frac{\alpha l_{\text{э}}}{\lambda_{\text{ж}}}$  ( $l_{\text{э}}$  – эквивалентный диаметр гранулы;  $\lambda_{\text{ж}}$  – для сушильного агента);  $Re = \frac{\rho v l_{\text{э}}}{\mu_{\text{ж}}}$  ( $\rho v$  – массовая скорость сушильного агента;  $\mu_{\text{ж}}$  – его коэффициент).

Выражение (4) можно трансформировать в вид, который дает возможность вычислять  $\alpha$  при переменной скорости теплового агента при определенной  $T$ :

$$\alpha = 0,123\lambda_{\text{ж}}l_{\text{э}}^{-0,17} \left(\frac{\rho_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}}\right)^{0,83} v^{0,83}, \quad (5)$$

для которого значения теплофизических величин  $\lambda_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{ж}}$  и  $\mu_{\text{ж}}$  для теплоносителя (воздух) известны [16, 18], а эквивалентный размер  $l_{\text{э}}$  определяется по известным методикам.

Учитывая, что величины входящие в соотношение (5), зависят от температуры теплоносителя, то для удобства его оперативного использования целесообразно получить ряд зависимостей, куда вводится обобщенный комплекс

$$K_{\alpha} = 0,123\lambda_{\text{ж}} \left(\frac{\rho_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}}\right)^{0,83}.$$

**Результаты исследования и их обсуждение.** Проведенные постановочные эксперименты показали, что время истечения штранга из фильеры без его разрыва превышает продолжительность заморозки и время образования корочки на его поверхности и, как следствие, подтверждают возможность практической реализации рекомендуемой технологии гранулирования (рис. 1).

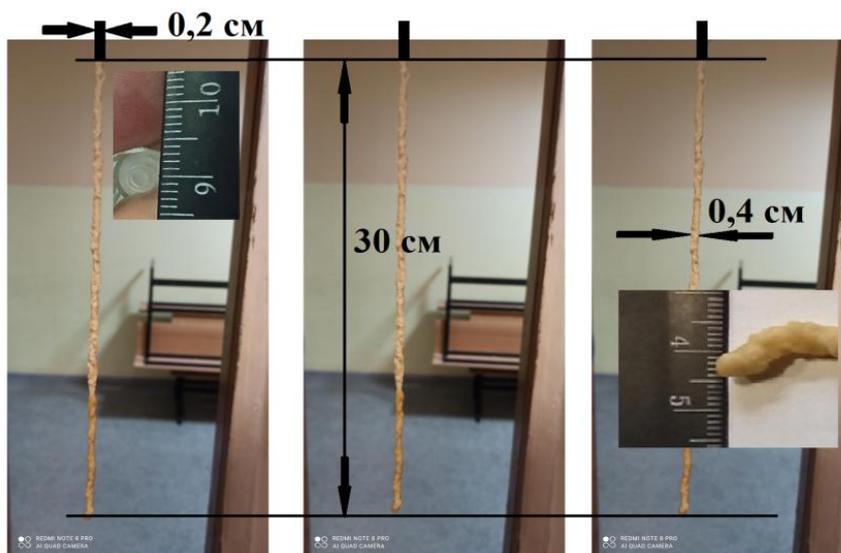


Рис. 1. Морфометрическая оценка полученного клейковинного штранга в случае его формования через фильерное отверстие 2 мм

Из представленных фотографий можно сделать вывод, что, несмотря на высокие вязкоупругие свойства клейковины, имеется возможность обеспечить необходимую длину и диаметр жгута по причине того, что, как показали эксперименты, его сила тяжести превышает внутренние силы упругости. Это свидетельствует

о том, что обеспечить заданные размеры и форму гранул для рациональной реализации процедуры их окончательной сушки возможно. В таблице 1 представлены различные морфометрические варианты получения замороженного гранулированного продукта.

Таблица 1

Габаритные размеры получаемых клейковинных гранул

Диаметр гранулы, мм	Длина гранулы, мм
4	10; 15; 20
6	10; 15; 20
8	15; 20

Визуальный морфометрический анализ свидетельствует о том, что гранулы имеют форму, близкую к цилиндрической, с малозначительным искривлением внешней поверхности при истечении штрангов в незамороженном виде (рис. 2). Указанные искривления сглаживаются при заморозке гранул на выходе из фильеры, что обуславливает возможность взять за основу их цилиндрическую форму при описании и моделировании процесса сушки. При этом ввиду

превышения длины гранулы по отношению к ее диаметру в 3 и более раза, а площади цилиндрической поверхности по отношению к двум торцевым – в 6 раз и более можно с достаточной инженерной точностью при построении модели считать данную гранулу бесконечным цилиндром по аналогии с бесконечной пластиной, а при постановке граничных условий теплообмена торцевые поверхности не учитывать.



Рис. 2. Фотографии полученного клейковинного продукта при его формовании через фильерное отверстие 2 мм

Опытные данные по нахождению физической плотности исходного и конечного сухого

продукта представлены в таблицах 2, 3.

Таблица 2

**Данные экспериментов по определению физической плотности исходного влажного продукта в пикнометрической емкости объемом 50 мл**

Номер опыта	Масса образца, г	Масса жидкости, г	Плотность бинарной смеси в емкости, г/мл	Плотность образца, кг/м <sup>3</sup>
1	1,11	38,59	0,794	1018
2	1,26	38,48	0,795	1019
3	1,54	38,26	0,796	1021
4	2,11	37,81	0,798	1019
5	1,77	38,14	0,798	1017
Среднее значение				1019

Таблица 3

**Данные экспериментов по определению физической плотности конечного сухого продукта в пикнометрической емкости объемом 50 мл**

Номер опыта	Масса образца, г	Масса жидкости, г	Плотность бинарной смеси в емкости, г/мл	Плотность образца, кг/м <sup>3</sup>
1	2,14	35,88	760	472
2	2,56	35,13	754	468
3	1,84	36,37	764	471
4	3,15	34,15	746	469
5	3,38	33,83	744	474
Среднее значение				471

Учитывая, что значение плотности исходной влажной гранулы  $\rho_{исх} = 1019 \text{ кг/м}^3$ , получим величину плотности сухого остатка  $\rho_{с.о.} = 1037 \text{ кг/м}^3$ .

На рисунках 3, 4 приведена графическая интерпретация закономерностей варьирования физической и истинной  $\rho$  объекта изучения в пределах варьирования  $T 274\text{--}363 \text{ }^\circ\text{K}$  и влажности в пределах от 0,10 до 0,47 кг/кг. Как правило,  $\rho$  обусловлена химическим составом и преимущественно долей воды или сухого остатка.

Понятно, что при росте концентрации сухого остатка растет и истинная  $\rho$ , однако физическая  $\rho$  включает и воздух, находящийся в порах продукта, тем самым влияя на конечную величину этого показателя.

График рисунка 3 линейно аппроксимирован для диапазона влажности  $W \leq 0,47 \text{ кг/кг}$  и справедлив в интервале температур от 274 до 363  $^\circ\text{K}$ :



**Рис. 3. Графическая интерпретация закономерности варьирования физической  $\rho$  объекта изучения от его влажности в пределах варьирования  $T 274\text{--}363 \text{ }^\circ\text{K}$**

$$\rho_{\phi} = 1481W + 322,9. \quad (6)$$

Средняя истинная  $\rho$  служит определяющими характеристиками физического состояния пищевого продукта, которые предопределяют его восприятие факторов внешней среды: воздействие контакта с влагой,  $T$  газовой среды и др. Его параметрическое состояние обуславливает реологические параметры и ТФХ пищевой про-

дукции, в частности механическую прочность, способность к формообразованию,  $\lambda$ , стабильность при низких  $T$  и др. Все это следует учитывать при проектировании пищевой техники и, кроме того, при решении ряда производственных задач, вопросов хранения, транспортировки и т. п.

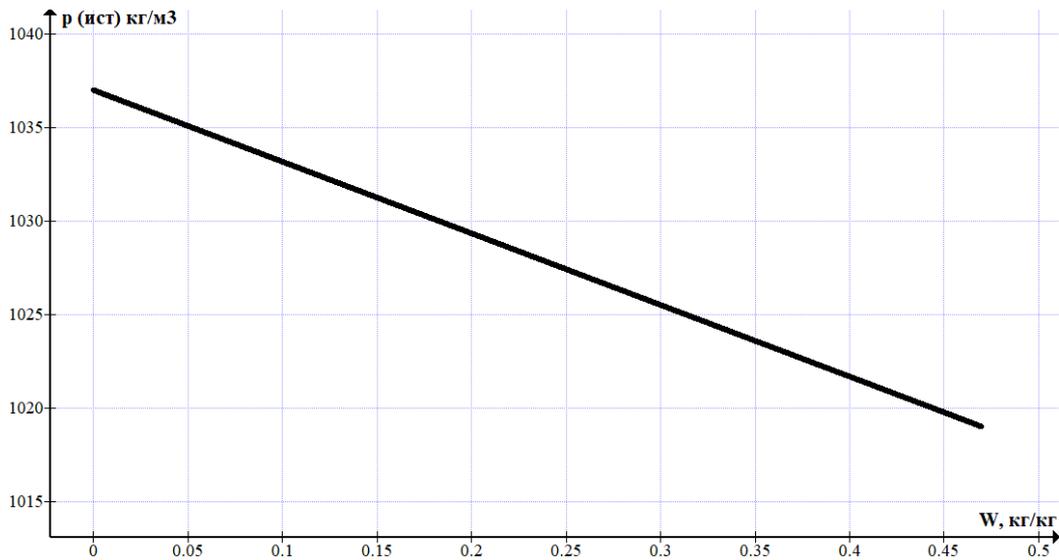


Рис. 4. График зависимости истинной плотности объекта исследования от его  $W$  в пределах варьирования  $T$  274–363 °K

График рисунка 4 был также линейно аппроксимирован для диапазона влажности  $(0,1 \text{ кг/кг} \leq W \leq \frac{0,47 \text{ кг}}{\text{кг}})$  и справедлив в интервале температур от 274 до 363 °K:

$$\rho_{и} = 1037 - 38,3W. \quad (7)$$

В итоге для гранул при их средней влажности 47,4 % были найдены величины, представленные в таблице 4.

Таблица 4

Результаты по эмпирическому нахождению ТФХ клейковинных гранул

Номер опыта	W, %	$c_M$ , Дж/(кг·K)	$a \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м·K)
1	47,4	3181	1,510	0,489
2		3210	1,518	0,496
3		3205	1,512	0,494
4		3198	1,505	0,490
5		3189	1,519	0,494
Среднее значение	47,4	3197	1,513	0,493

Рассчитанная величина  $c_{с.о}$  составила  $2308 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ .

На рисунке 5 представлен график зависимости  $c_M$  исследуемой гранулированной пшеничной клейковины для интервала температур от 274 до 363 °К от ее влажности.



Рис. 5. График зависимости  $c_M$  исследуемых гранул от их влажности

График рисунка 5 получен по зависимости  $c_M$  и  $T$  от 274 до 363 °К: в пределах  $0,1 \text{ кг/кг} \leq W \leq 0,474 \text{ кг/кг}$

$$c_M = 1875,5W + 2308. \quad (8)$$

Для  $W$ , составляющей 47,4 %, значение  $\lambda$  уже найдено (табл. 4), вследствие чего не трудно найти  $B_{\text{поп}}$ , к тому же при  $W = 47,4 \%$  и  $\frac{\rho_{\Phi}}{\rho_{\text{и}}} = 1$   $B_{\text{поп}} = -0,000437$ .

В итоге, используя коэффициент  $B$ , вычисленный поправочный коэффициент  $B_{\text{поп}}$ , а так-

же эмпирические коэффициенты  $A = 0,47$  и  $C = 0,25$ , получим математическую зависимость теплопроводности для исследуемых гранул от их влажности. На рисунке 6 представлена ее графическая интерпретация.



Рис. 6. Графическая интерпретация закономерности варьирования  $\lambda$  исследуемых гранул при переменной влажности

График 6 построен согласно вышеприведенному уравнению, но для удобства в инженерных расчетах ее целесообразно аппроксимировать линейной зависимостью (9), которая будет

$$\lambda = 0,338W + 0,334. \tag{9}$$

На рисунке 7 представлен график зависимости  $a = f(W)$  гранулированного клейковинного продукта в интервалах температур от 274 до

справедлива для диапазона влажности  $0,1 \leq W \leq 0,474$  кг/кг и интервала температур от 274 до 363 °К:

363 °К и влажности от 0,1 до 0,474 кг/кг, построенный по известной зависимости и адаптированный под объект исследования:

$$a = \frac{0,338W + 0,334}{(1481W + 322,9) \cdot (1875,5W + 2308)}, \tag{10}$$

где  $W$  – влажность исследуемого продукта, кг/кг.

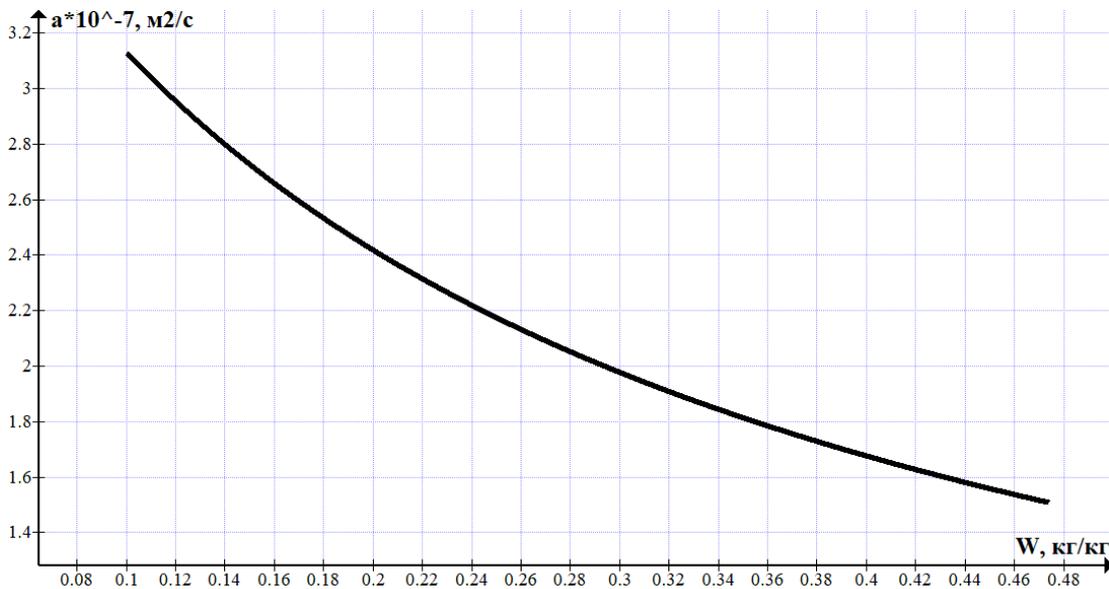


Рис. 7. Графическая интерпретация закономерности варьирования  $a$  исследуемых гранул при переменной влажности

Построим по уравнению (10) номограмму, дающую возможность упрощенно геометрически использовать и анализировать закономерности варьирования параметров, исключая вычислительные процедуры.

В таблицах 5, 6 представлены численные значения используемых характеристик и комплекса  $K_\alpha$  для различных температур сушильного агента.

Таблица 5

**Значения величин  $\lambda_{ж}$ ,  $\rho_{ж}$  и  $\mu_{ж}$  для теплоносителя при различных температурах**

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{ж}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\mu_{ж}, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\rho_{ж}, \text{кг}/\text{м}^3$
50	$2,83 \cdot 10^{-2}$	$19,6 \cdot 10^{-6}$	1,093
60	$2,90 \cdot 10^{-2}$	$20,1 \cdot 10^{-6}$	1,060
70	$2,96 \cdot 10^{-2}$	$20,6 \cdot 10^{-6}$	1,029
80	$3,05 \cdot 10^{-2}$	$21,1 \cdot 10^{-6}$	1,000
90	$3,13 \cdot 10^{-2}$	$21,5 \cdot 10^{-6}$	0,972
100	$3,21 \cdot 10^{-2}$	$21,9 \cdot 10^{-6}$	0,946

Значения  $K_\alpha$  для различных температур теплоносителя

Показатель	$t, ^\circ\text{C}$					
	50	60	70	80	90	100
$K_\alpha$	30,28	29,62	28,91	28,51	28,14	27,79

На рисунке 8 представлена номограмма зависимости коэффициента теплоотдачи клейковинных гранул в интервалах  $T$  от 50 до 100 °C и

скорости теплового агента от 3,0 до 15 м/с, рекомендованных в публикациях [19, 20].

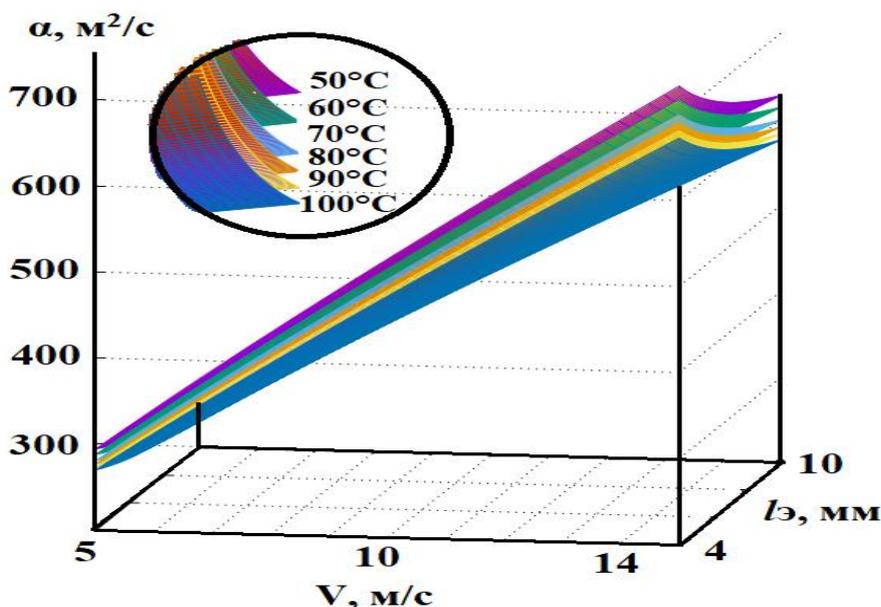


Рис. 8.  $\alpha \sim v$  номограмма в пределах варьирования  $T$  50–100 °C и скорости теплового агента от 5 до 15 м/с

**Выводы.** Таким образом, для проведения тепловых расчетных процедур для сушильных аппаратов осуществлен морфометрический анализ, теоретически и опытным путем найдены ТФХ и физическая плотность гранул пшеничной клейковины, кинетические параметры обмена тепловой энергией на границе фазового раздела в заданных пределах варьирования влажности и параметров сушильного агента, которые обуславливают выбор рационального способа обезвоживания изучаемого гранулированного продукта.

При этом проведенный анализ технической и патентной литературы позволил очертить наиболее перспективную область дальнейшего поиска рациональных условий сушки, а последующее экспериментальное исследование процесса обезвоживания клейковинных гранул на

лабораторных установках конвективной сушки и в псевдооживленном слое показало, что для исследуемого продукта, которым является замороженная и подсушенная до влажности 0,474 кг/кг гранула, наиболее приемлемым способом сушки является конвективный, при этом влагоудаление из гранулированного материала должно осуществляться при его нахождении в псевдооживленном состоянии.

### Литература

1. Оборудование по глубокой переработке зерна. Линии по производству крахмала и глютена из пшеницы. URL: [https:// china-bridge.ru](https://china-bridge.ru) (дата обращения: 01.04.2021).
2. Технология получения пшеничной клейковины и крахмала. URL: <https://www.newche>

- mistry.ru/letter.php?n\_id=8650 (дата обращения: 04.04.2021).
3. *Фоменко Е.В.* Совершенствование процессов получения гранулированной клейковины пшеничной: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. Краснодар, 2019. 167 с.
  4. *Алексамян А.И., Алексамян О.А.* Особенности механизма замораживания и вымерзания влаги в мясе рыбы и рыбном фарше // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сб. ст. по мат-лам III–IV междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2018. С. 72–76.
  5. *Алексамян А.И., Фоменко Е.В.* Современное состояние технологий замораживания рыбных фаршевых полуфабрикатов // Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по мат-лам XII междунар. науч.-практ. конф. М., 2018. С. 102–105.
  6. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. М.: Физматлит, 2006. 520 с.
  7. *Зайдель А.Н.* Ошибки измерений физических величин: метод. рекомендации. СПб.: Лань, 2005. 112 с.
  8. ГОСТ Р 8.736-2011 ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов наблюдений. М.: Стандартинформ, 2013. 19 с.
  9. *Красников В.В., Панин А.С., Скверчак В.Д.* Метод комплексного определения теплофизических характеристик вязких жидких, пастообразных и мелкодисперсных материалов // Известия вузов СССР. Пищевая технология. 1976. № 2. С. 138.
  10. *Панин А.С., Скверчак В.Д.* Экспресс-метод определения коэффициента теплопроводности пастообразных и мелкодисперсных материалов // Известия вузов СССР. Пищевая технология. 1974. № 1. С. 140–143.
  11. *Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И.* Теплофизические характеристики пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.
  12. *Гинзбург А.С., Громов М.А.* Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов. М.: Агропромиздат, 1987. 272 с.
  13. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов. М.: Альянс, 2005. 753 с.
  14. *Исаченко В.Л., Осипова В.А., Сукомел А.Е.* Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 458 с.
  15. *Максименко Ю.А.* Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии: дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.18. Воронеж, 2016. 502 с.
  16. *Нгуен Тхи Сен.* Разработка способа сушки плодов (соплодия) джекфрута с защитным биопокрывом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. Краснодар, 2020. 20 с.
  17. *Алексамян И.Ю.* Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12. М., 2001. 52 с.
  18. Физические свойства воздуха. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svoystva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya> (дата обращения: 01.04.2021).
  19. *Лыков А.В.* Тепло- и массообмен в процессах сушки. М.: Гостоптехиздат, 1956. 464 с.
  20. *Филоненко Г.К., Гришин М.А., Гольденберг Я.М. и др.* Сушка пищевых растительных материалов. М.: Пищевая промышленность, 1971. 440 с.

## References

1. *Oborudovanie po glubokoi pererabotke zerna. Linii po proizvodstvu krakhmala i glyutena iz pshenitsy.* URL: [https:// china-bridge.ru](https://china-bridge.ru) (data obrashcheniya: 01.04.2021).
2. *Tekhnologiya polucheniya pshenichnoi kleikoviny i krakhmala.* URL: [https://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=8650](https://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=8650) (data obrashcheniya: 04.04.2021).
3. *Fomenko E.V. Sovershenstvovanie protsessov polucheniya granulirovannoi kleikoviny pshe-nichnoi: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.18.12. Krasnodar, 2019. 167 s.*
4. *Aleksanyan A.I., Aleksanyan O.A. Osobennosti mekhanizma zamorazhi-vaniya i vymerzaniya vlagi v myase ryby i rybnom farshe // Vo-prosy tekhnicheskikh i fiziko-matematicheskikh nauk v svete sovremennykh issledovaniy: sb. st. po mat-lam III–IV mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Novosibirsk, 2018. S. 72–76.*

5. *Aleksanyan A.I., Fomenko E.V.* Sovremennoe sostoyanie tekhnologii zamorazhivaniya rybnykh farshevykh polufabrikatov // *Tekhnicheskie nauki: problemy i resheniya: sb. st. po mat-lam XII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. M., 2018. S. 102–105.*
6. *Sivukhin D.V.* Obshchii kurs fiziki. M.: Fizmatlit, 2006. 520 s.
7. *Zaidel' A.N.* Oshibki izmerenii fizicheskikh velichin: metod. rekomendatsii. SPb.: Lan', 2005. 112 s.
8. GOST R 8.736-2011 GSI. Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov nablyudenii. M.: Standartinform, 2013. 19 s.
9. *Krasnikov V.V., Panin A.S., Skverchak V.D.* Metod kompleksnogo opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik vyazkikh zhidkikh, pastobraznykh i melkodispersnykh materialov // *Izvestiya vuzov SSSR. Pishchevaya tekhnologiya. 1976. № 2. S. 138.*
10. *Panin A.S., Skverchak V.D.* Ehkspress-metod opredeleniya koehffitsienta teploprovodnosti pastobraznykh i melkodispersnykh materialov // *Izvestiya vuzov SSSR. Pishchevaya tekhnologiya. 1974. № 1. S. 140–143.*
11. *Ginzburg A.S., Gromov M.A., Krasovskaya G.I.* Teplofizicheskie kharakteristiki pishchevykh produktov. M.: Pishchevaya promyshlennost', 1980. 288 s.
12. *Ginzburg A.S., Gromov M.A.* Teplofizicheskie kharakteristiki kartofelya, ovoshchei i plodov. M.: Agropromizdat, 1987. 272 s.
13. *Kasatkin A.G.* Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii: ucheb. dlya vuzov. M.: Al'yans, 2005. 753 s.
14. *Isachenko V.L., Osipova V.A., Sukomel A.E.* Teploperedacha. M.: Ehnergiya, 1975. 458 s.
15. *Maksimenko Yu.A.* Razvitie nauchno-prakticheskikh osnov i sover-shenstvovanie protsessov sushki rastitel'nogo syr'ya v dispergirovannom sostoyanii: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.12.18. Voronezh, 2016. 502 s.
16. *Nguen Tkhi Sen.* Razrabotka sposoba sushki plodov (soplodiya) dzhekfruta s zashchitnym biopokrytiem: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.18.12. Krasnodar, 2020. 20 s.
17. *Aleksanyan I.Yu.* Razvitie nauchnykh osnov protsessov vysokointen-sivnoi sushki produktov zhivotnogo i rastitel'nogo proiskhozhdeniya: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.18.12. M., 2001. 52 s.
18. Fizicheskie svoistva vozdukha. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovyesmesil/fizicheskie-svoystva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya> (data obrashcheniya: 01.04.2021).
19. *Lykov A.V.* Teplo- i massoobmen v protsessakh sushki. M.: Gostoptekhizdat, 1956. 464 s.
20. *Filonenko G.K., Grishin M.A., Gol'denberg Ya.M. i dr.* Sushka pishchevykh rastitel'nykh materialov. M.: Pishchevaya promyshlennost', 1971. 440 s.

