

Екатерина Николаевна Мясоедова – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университеті, Республика Казахстан; e-mail: Kate_white89@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2142-3483>.

Дмитрий Викторович Мясоедов – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизации и информационных технологий», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3279-0994>.

Камшат Серикхановна Зарыкбаева – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университеті, Республика Казахстан; e-mail: kamshat.ru@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8115-357X>.

Айгерим Еркеновна Сатыбалдинова – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университеті, Республика Казахстан; e-mail: aigerimsemei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7610-9058>.

Information about the authors

Zhan Aldazhumanov* – Master of of technical sciences, senior lecturer «Technical physics and thermal power engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aldazhumanov.zhan@yandex.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1683-1089>.

Ekaterina Myassoedova – Master of of technical sciences, lecturer «Technical physics and thermal power engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Kate_white89@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2142-3483>.

Dmitry Myassoedov – Master of of technical sciences, senior lecturer «Department of Automation and Information Technologies», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3279-0994>.

Kamshat Zarykbaeva – Master of of technical sciences, senior lecturer «Technical physics and thermal power engineering», Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: kamshat.ru@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8115-357X>.

Aigerim Satybalidinova – Master of of technical sciences, lecturer «Technical physics and thermal power engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aigerimsemei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7610-9058>.

Редакцияға енуі 24.10.2025
Өңдеуден кейін түсуі 08.12.2025
Жариялауға қабылданды 15.12.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-57](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-57)

МРНТИ: 44.31.35



А.Қ. Садықова^{1*}, А.К. Ниязбаев², М.Ж. Хазимов^{1,2}

¹Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, 050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынулы, дом 126/1

²Казахский национальный аграрный исследовательский университет, 050010, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект Абая, дом 8

*e-mail: ai.sadykova@aes.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СОЕВОЙ ОКАРЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛОВЫЙ ПРОЦЕСС ВИХРЕВОЙ СУШКИ

Аннотация: В работе исследованы деформационные свойства соевой окары при различной влажности с использованием структурометра СТ-2. Установлены зависимости абсолютной деформации, относительной деформации, механического напряжения и модуля упругости от содержания влаги в образцах. Абсолютная деформация изменялась от 4,33 мм при влажности 28% до 17,04 мм при 76%, а относительная деформация – от 0,072 до 0,284 в тех же условиях. Значения модуля упругости изменялись в пределах от 6815 г/см² при 28% влажности до 1729 г/см² при 76%. Показано, что при влажности 40-56 % формируется оптимальное сочетание механической стабильности частиц и интенсивности теплопередачи, что обеспечивает снижение удельных энергозатрат на 8-12 % и устойчивость теплового режима. Полученные зависимости абсолютной и относительной деформации, механического напряжения и модуля упругости позволяют

©А.Қ. Садықова, А.К. Ниязбаев, М.Ж. Хазимов, 2026

обосновать рациональные режимы вихревой сушки, что имеет практическую значимость для теплоэнергетических процессов обезвоживания пищевых материалов. Показано, что деформационные характеристики напрямую связаны с энергозатратами при вихревой сушке, влияя на равномерность тепломассообмена и эффективность использования тепловой энергии. Полученные результаты могут быть использованы при расчёте режимов вихревой сушки, для снижения затраты энергии тепломассообменных процессов и проектировании энергоэффективных сушильных установок.

Ключевые слова: вихревая сушка, энергоэффективность, деформационные свойства, теплопередача, соевая окара, структурометр СТ-2.

Введение

В мировой практике всё большее распространение получают методы интенсификации тепломассообменных процессов, основанные на управлении структурой потока, температурными градиентами и свойствами обрабатываемого материала. Среди таких методов особое внимание уделяется вихревой сушке, которая обеспечивает эффективное использование тепловой энергии за счёт развития турбулентности и повышения коэффициента теплопередачи. Однако при проектировании и эксплуатации вихревых систем остаются недостаточно исследованными вопросы влияния физико-механических свойств материала на устойчивость и энергоэффективность теплового режима [1, 2].

Современные направления прикладной теплоэнергетики ориентированы на разработку энергоэффективных технологий тепловой обработки дисперсных и капиллярно-пористых материалов. Одной из актуальных задач является повышение эффективности процессов сушки, которые сопровождаются значительными потерями тепла и высоким удельным энергопотреблением [3]. Важное значение имеют исследования, направленные на снижение расхода тепловой энергии при сохранении стабильности температурного режима и равномерности прогрева материала [4].

Особый интерес представляют процессы вихревой сушки, основанные на использовании закрученного потока горячего воздуха. Вихревой принцип организации теплообмена обеспечивает интенсивное испарение влаги и эффективное использование подводимого тепла за счёт развития турбулентности и увеличения коэффициента теплопередачи. Такие установки широко применяются для обезвоживания дисперсных биоматериалов и других высоковлажных масс [5].

Энергоэффективность вихревой сушки определяется не только параметрами теплоносителя, но и физико-механическими свойствами высушиваемого материала. Изменение влажности существенно влияет на его деформационные характеристики, пористость и теплопроводность, что в конечном итоге отражается на интенсивности тепломассообмена и равномерности прогрева [6, 7]. Однако данный аспект недостаточно изучен, что затрудняет разработку оптимальных режимов сушки и расчёт энергоэффективных конструкций сушильных установок [8].

В настоящей работе рассматривается влияние деформационных свойств соевой окары на энергоэффективность теплового процесса вихревой сушки [9, 10]. Окара использовалась как дисперсный материал растительного происхождения, характеризующийся капиллярно-пористой структурой, высокой влагоёмкостью и выраженными изменениями механических свойств при варьировании влажности [11].

Соевая окара обладает высоким содержанием влаги (80-85%), что делает ее нестабильной и не подходящей для длительного хранения. Для успешной интеграции соевой окары в различные производственные процессы необходимо снижение влажности до оптимального уровня [6]. Особое значение имеют деформационные характеристики материала, которые определяют механические энергозатраты на перемешивание и диспергирование частиц [12]. При высокой влажности окара пластична и легко вовлекается в поток, при низкой – жёсткая и требует повышенных энергозатрат на диспергирование. Таким образом, исследование зависимости деформационных свойств от влажности позволяет определить оптимальные режимы сушки и снизить суммарное энергопотребление [13, 14].

Для исследования деформационных свойств соевой окары метод структурометра СТ-2 представляет собой эффективный инструмент, обладая рядом значимых преимуществ [15, 16]. Его высокая точность измерений вязкости и пластичности материала обеспечивает надёжные данные, необходимые для улучшения технологических процессов производства [17]. Простота использования структурометра СТ-2 делает его удобным выбором как для

научных исследований, так и для промышленных приложений, где требуется быстрое и точное измерение деформационных параметров [18].

В условиях вихревой сушки деформационные свойства дисперсного материала определяют характер его взаимодействия с закрученным потоком теплоносителя. Пластичность, модуль упругости и сопротивление деформации влияют на степень диспергирования частиц, формирование эффективной поверхности теплообмена, а также устойчивость вихревой структуры потока. Изменение механических свойств материала при варьировании влажности приводит к перераспределению тепловых и механических энергозатрат, что непосредственно отражается на теплоэнергетической эффективности процесса сушки.

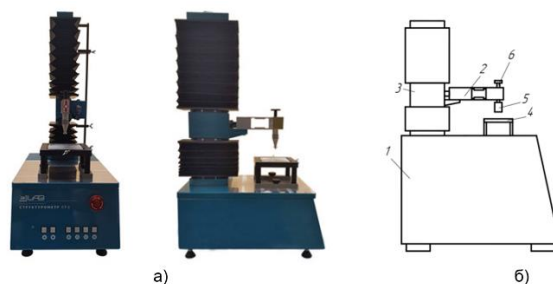
Полученные в настоящей работе результаты являются частью комплексных исследований, направленных на разработку и обоснование энергоэффективной технологии вихревой сушки соевой окары. На основе выявленных закономерностей деформационных свойств и их влияния на тепломассообмен была разработана и запатентована технологическая установка для сушки окары (патент на изобретение) [19].

Научная новизна данного исследования заключается в получении зависимостей механического напряжения, величины относительной деформации и модуля упругости от влажности соевой окары. Результаты исследования могут иметь значимость для разработки более эффективных и устойчивых методов предварительного обезвоживания до сушки путем центрифугирования или прессования. Так как в этих механических процессах обезвоживания полученные закономерности играют ключевую роль управлением режимов механизмов для снижения энергозатраты.

Цель исследования заключается в установлении закономерностей деформационных характеристик соевой окары при различной влажности и анализе их влияния на теплоэнергетическую эффективность процесса вихревой сушки.

Условия и методы исследования

Устройство прибора представляет собой: аналитический механизм с микропроцессорным управлением; идентор, создающий нагрузку на испытуемый объект; тензобалку и прикреплённый к ней тензодатчик, фиксирующий и измеряющий степень деформации объекта; съёмный столик для испытаний; регуляторы расположения тензодатчика; сменные насадки тензодатчика; кнопки ручного управления прибором, кнопку аварийного отключения, а также порты для кабеля питания и подключения к ПК. На рисунке 1 показаны конструкция и схема структурометра СТ – 2.



а – общий вид структурометра СТ-2; б – схема структурометра СТ-2;
1 – блок управления; 2 – тензобалка; 3 – штанга; 4 – столик для испытаний; 5 – идентор «цилиндр»;
6 – регуляторы расположения тензодатчика

Рисунок 1 – Структурометр СТ-2

Процесс исследования осуществляется благодаря: сравнению статистических показателей механической нагрузки на объект; измерений силы нагрузки и требуемых усилий для её осуществления (Измерения осуществляются благодаря тензодатчику и подключаемых к нему насадок-иденторов);

Процедура испытания структурометром СТ-2 проходит по методикам исследования двух типов:

– методики, в которых скорость фиксирована, и измеряет скорость перемещения иденторов в мм/с. Данные методики подходят для измерения жидкостей и степени их вязкости;

– методики, также подразумевающие фиксированную скорость, и измеряющие скорость нагружения в г/с, методики этого типа подходят для анализов, связанных с более твёрдыми веществами и показателями пластичности [20].

Для проведения исследования необходимо придерживаться следующего алгоритма:

1. Температура в помещении для анализа должна быть в диапазоне от 10 до 35°C, а относительная влажность воздуха не должна превышать 80% (при температуре 25°C).

2. Установить структурометр на устойчивом столе или столе, предусматривающем бетонной или гранитную платформу, а также обеспечить прибору защиту от попадания прямых солнечных лучей.

3. Подключить кабель питания, USB шнур для соединения с ПК, а также двусторонний кабель, соединяющий прибор и тензобалку.

4. Убедиться в том, что на ПК установлено необходимое программное обеспечение и драйверы структурометра.

Перед первым запуском прибора, а также в случаях замены индентора или тензодатчика, необходимо проводить калибровку. Калибровка структурометра осуществляется благодаря эталонной гире, входящей в комплект. Проведение калибровки осуществляется непосредственно в программе структурометра, а полный её процесс подробно описан в инструкции по эксплуатации.

Тестирование и анализ результатов происходит в автоматическом режиме на компьютере, который с помощью специального программного обеспечения управляет Структурометром СТ 2. Перед началом эксперимента был задан режим работы прибора. Выбор инструмента, приспособлений и подготовку образца осуществляют в соответствии с методическими указаниями. Для анализа в качестве инструмента был взят индентор «Цилиндр». Методика основана на определении общей, пластической и упругой деформаций соевой окары при сжатии его индентором «Цилиндр Ø36» со скоростью движения 0,5 мм/с после касания мякоти с усилием 7г до конечного усилия нагружения 500г, после чего начинается реверсивное движение индентора с той же скоростью движения до усилия в 7г.

Соевую окару плотно закладывали шпателем в цилиндрическую емкость (банку). Первоначальное значение высоты образцов, (h_0) – 60 мм. Емкость с соевой окарой помещают на столик строго по оси инструмента. После этого с помощью программного обеспечения стрелками «↑» и «↓» устанавливали столик в наиболее подходящее для проведения измерений положение. Затем после нажатия на кнопку «Старт» начинается автоматическое движение «Цилиндра», т.е. происходит погружение индентора в испытуемый образец. Программное обеспечение автоматически считывает показания прибора. После погружения и возврата индентора завершаем измерения нажатием кнопки «Стоп». После чего данные эксперимента сохраняются в виде таблицы и графиков. На рисунке 2 представлен Структурометр СТ-2 с индентором «Цилиндр».



Рисунок 2 – Структурометр СТ-2 с индентором «Цилиндр»

Данные на компьютер передаются в формате «*.xls», т.е. с расширением Microsoft Excel, что значительно упрощает обработку данных.

При использовании цилиндра образец нагружают с постоянной скоростью, а возникающую при этом силу измеряют как функцию высоты пробы $F(h)$. Для определения деформационных констант необходимо рассчитать механическое напряжение и относительную деформацию, возникающие при деформации образца.

Относительная деформация вычислялась по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (1)$$

где ε – относительная деформация;

Δh – абсолютная деформация, мм;

h_0 – первоначальное значение высоты образцов, мм.

Механическое напряжение определялось по формуле:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{S}, \quad (2)$$

где σ – напряжение, г/см²;

F_{max} – усилие нагружения, г;

S – площадь сечения цилиндрического индентера, см².

В зависимости от формулы (1) и (2) определили модуль упругости:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости, г/см²;

σ – напряжение, г/см²;

ε – относительная деформация.

Для эксперимента были взяты 5 образцов соевой окары, с различной влажностью (рис. 3, б). Влажность исследуемого материала была определена перед каждым исследованием деформационных характеристик [21]. Партии исследуемых образцов предварительно подвергались к тепловой обработке путем изменения экспозиции времени для получения различной влажности образцов. Влажность определялась Анализатором влажности «Sartorius» (рис. 3, а) [21].



а)



б)

а – анализатор влажности «Sartorius»; б – образцы соевой окары различной влажности

Рисунок 3 – Установка для определения влажности

Для количественной оценки влияния деформационных свойств соевой окары на теплоэнергетическую эффективность вихревой сушки был выполнен расчёт тепловых и механических составляющих энергозатрат при снижении влажности материала с 76% до 28%.

Масса испаряемой влаги при сушке определяется по выражению:

$$m_{вл} = W_1 - W_2, \quad (4)$$

где $m_{вл}$ – масса испаряемой влаги, кг;

W_1 – начальная массовая доля влаги, кг;

W_2 – конечная массовая доля влаги, кг.

Удельные тепловые затраты на испарение влаги рассчитываются по формуле:

$$Q_{исп} = m_{вл} \cdot r, \quad (5)$$

где $Q_{исп}$ – удельные тепловые затраты, кДж;

$m_{вл}$ – масса испаряемой влаги, кг;

r – удельная теплота парообразования воды, кДж/кг. $r = 2258$ кДж/кг.

Результаты и обсуждения

Деформационные характеристики материала отражают его микроструктурное состояние. Снижение модуля упругости и рост относительной деформации при увеличении влажности свидетельствуют о повышении пористости и ослаблении межчастичных связей, что согласуется с известными представлениями о поведении капиллярно-пористых биоматериалов при тепловой обработке [7, 8]. Микроструктурные изменения материала опосредованно отражаются в изменении его деформационных характеристик, что позволяет

использовать механические показатели как интегральные параметры структуры. Таким образом, механические испытания позволяют косвенно оценивать изменения микроструктуры без привлечения сложных методов визуализации.

При 76% влажности абсолютная деформация составила 17,04 мм, что соответствует относительной деформации 0,284. Модуль упругости при этом минимален – всего 1729 г/см², что указывает на высокую пластичность и податливость материала к нагрузке. Однако высокая влажность приводит к значительным тепловым затратам на испарение влаги, что снижает общую энергоэффективность. На рисунке 4 представлена зависимость деформации соевой окары от усилия при влажности 76%.

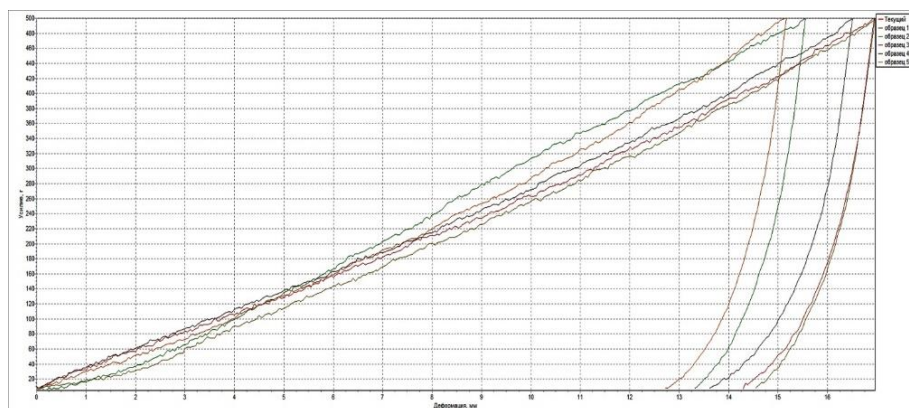


Рисунок 4 – Результаты определения деформационных характеристик соевой окары при влажности 76%

Для образцов с влажностью 64% абсолютная деформация достигла 16,91 мм, а относительная – 0,282. Модуль упругости составил 1742 г/см², что близко к показателям при 76%. Механические энергозатраты остаются низкими, но тепловая нагрузка немного снижается по сравнению с 76%. Такой режим ближе к оптимальному по совокупным энергозатратам. На рисунке 5 представлена зависимость деформации соевой окары от усилия при влажности 64%.

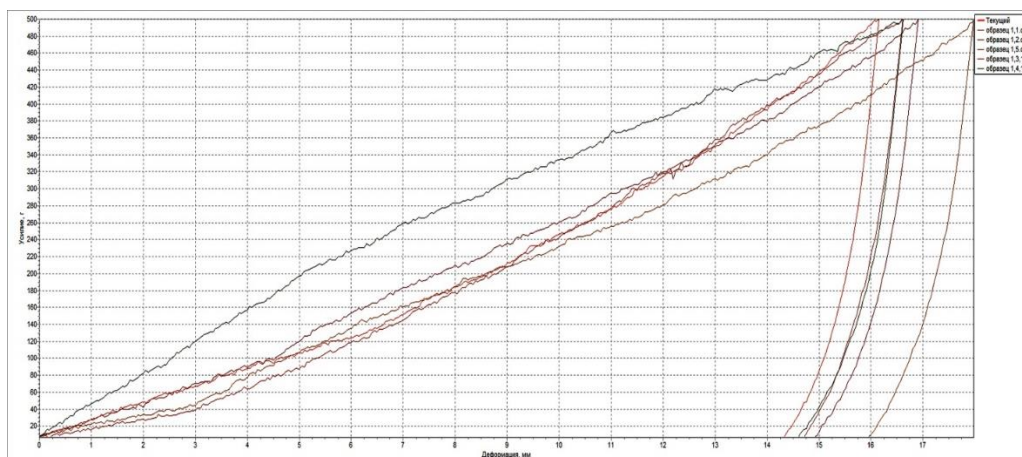


Рисунок 5 – Результаты определения деформационных характеристик соевой окары при влажности 64%

При снижении влажности до 56% абсолютная деформация составила 15,84 мм, относительная – 0,264, а модуль упругости увеличился до 1860 г/см². Соевая окара проявляет выраженные упругие свойства, возрастает сопротивляемость нагрузке, кривые нагружения становятся более крутыми. Это означает рост механических энергозатрат на перемешивание, однако при этом тепловая нагрузка снижается. На рисунке 6 представлена зависимость деформации соевой окары от усилия при влажности 56%.

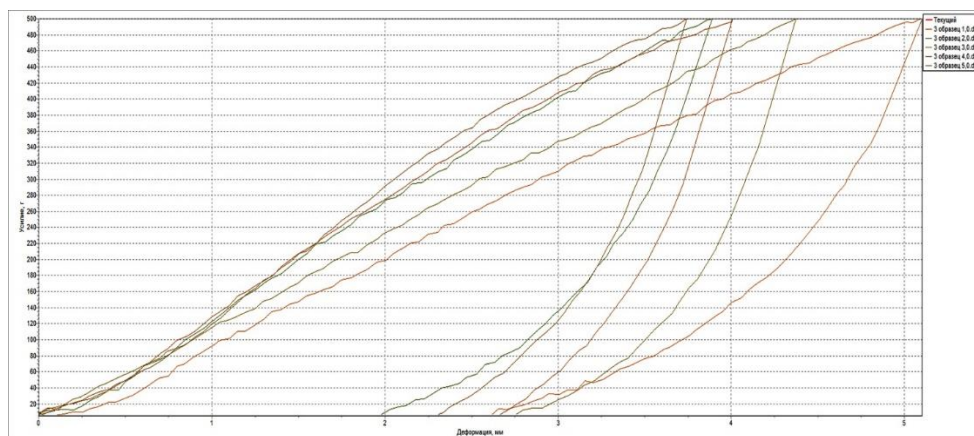


Рисунок 6 – Результаты определения деформационных характеристик соевой окары при влажности 56%

При влажности 40% зафиксирована абсолютная деформация 10,40 мм, относительная – 0,173. Модуль упругости вырос до 2837 г/см², что почти в 1,5 раза выше по сравнению с 56%. Материал становится жёстким, его структура уплотняется. Для вихревой сушилки это приводит к увеличению энергозатрат на перемешивание и диспергирование частиц. На рисунке 7 представлена зависимость деформации соевой окары от усилия при влажности 40%.

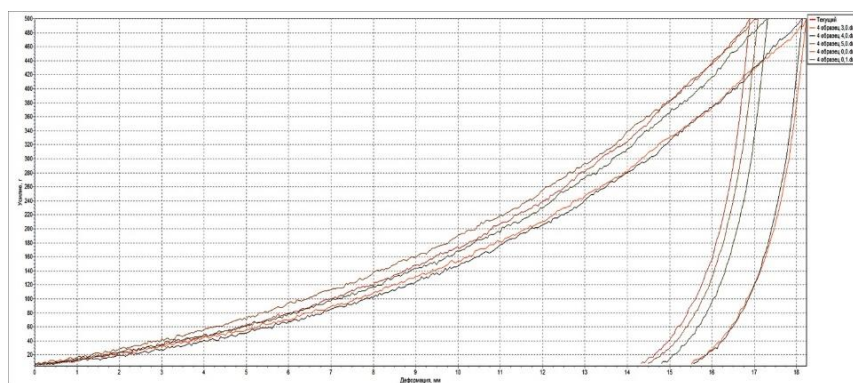


Рисунок 7– Результаты определения деформационных характеристик соевой окары при влажности 40%

Наименьшая влажность (28%) соответствует минимальной абсолютной деформации 4,33 мм и относительной деформации 0,072. При этом модуль упругости достиг максимального значения – 6815 г/см², что говорит о высокой жёсткости и низкой пластичности материала. Механические энергозатраты возрастают многократно, тепломассообмен нарушается. На рисунке 8 представлена зависимость деформации соевой окары от усилия при влажности 28%.

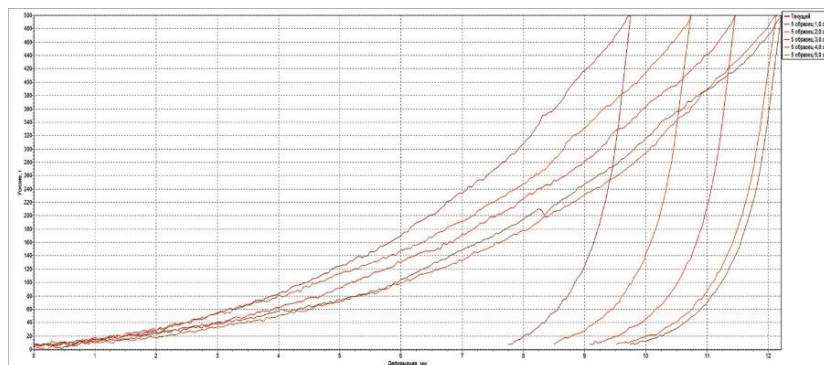


Рисунок 8 – Результаты исследования деформационных характеристик при влажности 28%

Вихревая сушка характеризуется интенсивным тепломассообменом, эффективность которого определяется устойчивостью вихревого движения и равномерностью распределения частиц в объёме сушильной камеры. При высокой влажности (64-76%) соевая окара обладает повышенной пластичностью и низким модулем упругости, что облегчает её вовлечение в поток и снижает механические энергозатраты. Однако при этом увеличивается тепловая нагрузка, связанная с испарением избыточной влаги.

При дальнейшем снижении влажности (до 28%) резкое увеличение модуля упругости приводит к росту сопротивления деформации, ухудшению диспергирования и нарушению равномерности тепломассообмена. Это вызывает увеличение как механических, так и тепловых энергозатрат, что снижает общую энергоэффективность вихревой сушки. Таким образом, при снижении влажности соевой окары с 76% до 28% 1084 кДж тепловой энергии на испарение влаги $Q_{исп}$ расходуется исключительно на фазовый переход влаги. В настоящей работе тепловая составляющая энергозатрат рассматривалась как энергия, необходимая для фазового перехода влаги при сушке материала. Механическая составляющая энергопотребления, связанная с деформацией, диспергированием и перемешиванием частиц в вихревом потоке, оценивалась качественно на основе изменения деформационных характеристик материала при различной влажности. Принятые допущения позволяют сопоставить вклад тепловых и механических факторов в общую энергоэффективность процесса вихревой сушки.

Установленные зависимости деформационных характеристик соевой окары от влажности имеют значение при проектировании и эксплуатации вихревых сушильных установок. В разработанной технологической установке для сушки соевой окары, защищённой патентом, деформационные свойства материала учитываются при выборе скорости закрученного воздушного потока, температуры теплоносителя и интенсивности механического воздействия.

В диапазоне влажности 40-56% обеспечивается оптимальное соотношение пластичности и упругости частиц, что способствует устойчивому вихревому режиму, равномерному распределению материала в сушильной камере и интенсификации тепломассообмена. При этом снижается вероятность агломерации частиц и уменьшаются механические потери энергии на диспергирование, что подтверждает снижение удельных энергозатрат на 8-12%. Указанный диапазон влажности является рациональным для вихревых сушильных аппаратов с интенсивным турбулентным режимом теплоносителя.

Таким образом, деформационные свойства соевой окары являются одним из ключевых факторов, определяющих теплоэнергетическую эффективность вихревой сушки, и должны учитываться при расчёте конструктивных и режимных параметров сушильных установок промышленного назначения.

В результате экспериментальных исследований установлена зависимость абсолютной и относительной деформаций материала от его влажности (рис. 9). Анализ полученных данных показывает, что с увеличением влажности материала наблюдается выраженный рост как абсолютной, так и относительной деформации, что свидетельствует о снижении жёсткости и увеличении податливости материала при увлажнении.

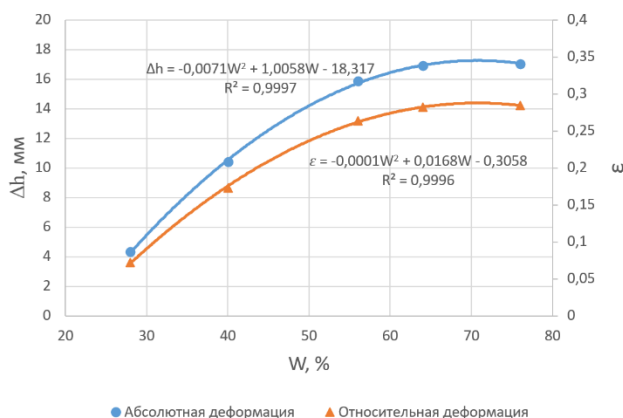


Рисунок 9 – Зависимость абсолютной и относительной деформации соевой окары от влажности

Абсолютная деформация материала возрастает в диапазоне влажности от 28 до 64%, достигая максимальных значений порядка 16-17 мм. Дальнейшее увеличение влажности до 76% не приводит к существенному росту деформации, что указывает на тенденцию к стабилизации деформационных свойств.

Аналогичный характер изменения наблюдается и для относительной деформации. При увеличении влажности от 28 до 64% относительная деформация возрастает почти в три раза, после чего рост замедляется и переходит в стадию насыщения. Максимальные значения относительной деформации достигают порядка 0,26-0,28, что подтверждает значительное влияние влаги на структурное состояние материала.

В ходе экспериментальных исследований была установлена зависимость напряжения и модуля упругости материала от его влажности (рис. 10). Анализ экспериментальных данных показывает, что изменение влажности оказывает различное влияние на прочностные и упругие характеристики материала.

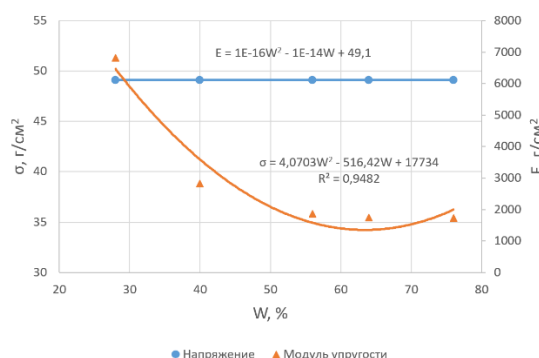


Рисунок 10 – Зависимость напряжения и модуля упругости соевой окары от влажности

Напряжение σ при нагрузке 500 г остаётся практически постоянным, что указывает на стабильность сопротивления материала в данных условиях.

В отличие от напряжения, модуль упругости демонстрирует выраженную зависимость от влажности материала. С увеличением влажности от 28 до 64% наблюдается резкое снижение модуля упругости более чем в два раза, что указывает на существенное уменьшение жёсткости материала под воздействием влаги. Минимальные значения модуля упругости достигаются при влажности 64%, после чего при дальнейшем увеличении влажности до 76 % отмечается незначительный рост данной характеристики. Повышение модуля упругости материала при снижении влажности приводит к изменению характера межфазного контакта частиц с теплоносителем, что отражается на интенсивности теплообмена и суммарных энергозатратах процесса вихревой сушки.

Совместный анализ напряжения и модуля упругости показывает, что при повышении влажности основное изменение механического поведения материала связано не с изменением предельных напряжений, а с уменьшением его упругой жёсткости. Это приводит к увеличению деформируемости материала при практически неизменных значениях напряжений, что согласуется с результатами анализа деформационных характеристик, представленными ранее. Полученные зависимости могут быть использованы при расчёте рациональных режимов вихревой сушки с целью повышения теплоэнергетической эффективности процесса. Экспериментальные исследования процесса сушки в вихревой сушилке являются предметом дальнейших исследований.

Заключение

Проведённые исследования показали, что деформационные характеристики соевой окары существенно зависят от её влажности. Можно сделать вывод, что энергия, затрачиваемая на перемещение и деформацию материала, перераспределяется, при низкой влажности она расходуется на преодоление упругих сил, а при высокой – на пластическую деформацию. Оптимальный диапазон влажности для вихревой сушки находится в области 40-56%, где достигается баланс между тепловыми и механическими затратами. Таким образом, повышение влажности приводит к росту деформационных характеристик и снижению жёсткости материала, что необходимо учитывать при выборе режимов сушки и

механической обработки, а также при разработке технологий получения пищевых порошков и комбинированных продуктов. Результаты исследования могут быть интегрированы в математические модели тепломассообмена, использованы при разработке сушильных установок, а также применены в промышленности для повышения энергоэффективности и устойчивости производственных процессов. Полученные экспериментальные зависимости использованы при разработке и патентовании технологической установки для вихревой сушки соевой окары. Результаты исследования представляют практический интерес для предприятий агропромышленного комплекса и могут быть использованы при проектировании и модернизации вихревых сушильных установок. Полученные зависимости были применены в рамках договорных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с промышленным партнёром ТОО «AGRITECH».

Список литературы

1. Пиралишвили С.А. Вихревой эффект и интенсификация процессов тепло- и массообмена в элементах энергетической техники / С.А. Пиралишвили, С.В. Веретенников // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 1(10). – С. 175-181.
2. He Y.-L. Advances and Outlooks of Heat Transfer Enhancement by Longitudinal Vortex Generators / Y.-L. He, Y. Zhang // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 94. – P. 728-745.
3. Shrinkage properties of porous materials during drying / J. Li et al // Frontiers in Materials. – 2024. – Vol. 11. – Art. 1330599.
4. Niu Z. Investigation of Heat and Moisture Transfer during the Drying of Packed-Bed Porous Media in Soybeans / Z. Niu, X. Lu, Z. Li // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14(5), 1935. <https://doi.org/10.3390/app14051935>.
5. Pavlenko A. Heat and Mass Transfer in Hygroscopic Porous Media: Consequences of Invoking Tóth's Sorption Isotherm / A. Pavlenko // Transport in Porous Media. – 2023. – Vol. 148. – P. 137-156. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-01931-7>.
6. Бабич А.А. Соя на корм / А.А. Бабич. – М.: Колос, 2000. – 112 с.
7. Study on the Enhancement Mechanism of Heat and Moisture Transfer in Deformable Porous Media / P. Li et al // Processes. – 2023. – № 11(9). – P. 2699. <https://doi.org/10.3390/pr11092699>.
8. Drying of porous media by concurrent drainage and evaporation: A pore network modeling study / H. Wu et al // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 149. – P. 119158. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118718>.
9. Enhancement of 3D mass and heat transfer within a porous ceramic heat exchanger by flow-induced vibration / R. Rzig et al // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7, № 15. – P. 13280-13289. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00907>.
10. Water status and predictive models of moisture content for soybean dregs during hot-air drying / T. Chen et al // Molecules. – 2022. – Vol. 27(14), Article 4421. <https://doi.org/10.3390/molecules27144421>.
11. Thermodynamic properties and drying kinetics of 'okara' / R.M. Guimarães et al // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. – 2018. – Vol. 22, № 6. – P. 418-423. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p418-423>.
12. Хазимов К.М. Интенсификация процесса сушки продуктов растительного происхождения с использованием солнечной энергии // Диссертация на соискание ученой степени доктора философии (PhD), Казахский национальный аграрный университет, Алматы. 2015 http://www.kaznau.kz/page/dissovet/dissovet_2015/diss_khazimov.pdf.
13. Recundo-Cuenca A. Soybean seeds and its by-product okara as sources of dietary fibre / A. Recundo-Cuenca, MJ Villaneuva-Suárez, I. Mateos-Aparicio // Measurement by AOAC and Englyst methods. Food Chem. – 2008. – № 108. – P. 1099-1105.
14. Верфел, Д.Б. Получение соевого масла и шрота: пер. с англ.; под ред. В.В. Ключкина, М.Л. Доморощенковой / Д.Б. Верфел, Н.Х. Витт. – М.: Колос, 2014. – 81 с.
15. Hamdami N. Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures / N. Hamdami, J.Y. Monteau, A. Le Bail // Part 2: Evaluation of the effective moisture diffusivity from drying data. Journal of Food Engineering. – 2004. – № 62. – P. 385-392.
16. Njie D.N. Thermal properties of cassava, yam and plantain / D.N. Njie, T.R. Rumsey, R.P. Singh // Journal of Food Engineering. – 1998. – № 37. – P. 63-76.

17. Доморощенкова М.Л. Современные технологии получения пищевых белков из соевого шрота / М.Л. Доморощенкова // Пищевая пром-сть. – 2001. – № 4. – С. 6-10.
18. Енкина В.Б. Соя / В.Б. Енкина. – М.: Колос, 1970.
19. Пат. 37358 Республика Казахстан. МПК F26B 3/02, F26B 9/06, F26B 21/00, F26B 23/00. Технологическая установка для сушки окары / Хазимов М.Ж., Погуляев А.Д., Хазимов К.М., Ниязбаев А.К., Садыкова А.Қ. – Заявл. 13.03.2024; опубл. 19.09.2025, Бюл. № 38. – URL: <https://gosreestr.kazpatent.kz/Invention/Details?docNumber=393987>.
20. Иган Ж.П. Соя! Соя! Соя! Великолепные рецепты здорового питания: пер. с англ. С. Холоднова // Ж.П. Иган. – М.: ФАИР-ПРЕСС, 2002. – 160 с.
21. Садыкова А.Қ. Определение деформационных характеристик соевой окары / А.Қ. Садыкова, А.К. Ниязбаев, А.М. Калиев // Техничко-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе. Материалы III Международной научно-практической конференции. Мелитополь, 2024. – С. 264-268.

References

1. Piralishvili S.A. Vikhrevoi ehffekt i intensivifikatsiya protsessov teplo- i massoobmena v ehlementakh ehnergeticheskoi tekhniki / S.A. Piralishvili, S.V. Veretennikov // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aehrokosmicheskogo universiteta. – 2011. – № 1(10). – С. 175-181. (In Russian).
2. He Y.-L. Advances and Outlooks of Heat Transfer Enhancement by Longitudinal Vortex Generators / Y.-L. He, Y. Zhang // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 94. – P. 728-745. (In English).
3. Shrinkage properties of porous materials during drying / J. Li et al // Frontiers in Materials. – 2024. – Vol. 11. – Art. 1330599. (In English).
4. Niu Z. Investigation of Heat and Moisture Transfer during the Drying of Packed-Bed Porous Media in Soybeans / Z. Niu, X. Lu, Z. Li // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14(5), 1935. <https://doi.org/10.3390/app14051935>. (In English).
5. Pavlenko A. Heat and Mass Transfer in Hygroscopic Porous Media: Consequences of Invoking Tóth's Sorption Isotherm / A. Pavlenko // Transport in Porous Media. – 2023. – Vol. 148. – R. 137-156. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-01931-7>. (In English).
6. Babich A.A. Soya na korm / A.A. Babich. – М.: Kolos, 2000.–112 s. (In Russian).
7. Study on the Enhancement Mechanism of Heat and Moisture Transfer in Deformable Porous Media / R. Li et al // Processes. – 2023. – № 11(9). – R. 2699. <https://doi.org/10.3390/pr11092699>. (In English).
8. Drying of porous media by concurrent drainage and evaporation: A pore network modeling study / H. Wu et al // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 149. – P. 119158. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118718>. (In English).
9. Enhancement of 3D mass and heat transfer within a porous ceramic heat exchanger by flow-induced vibration / R. Rzig et al // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7, № 15. – P. 13280-13289. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00907>. (In English).
10. Water status and predictive models of moisture content for soybean dregs during hot-air drying / T. Chen et al // Molecules. – 2022. – Vol. 27(14), Article 4421. <https://doi.org/10.3390/molecules27144421>. (In English).
11. Thermodynamic properties and drying kinetics of 'okara' / R.M. Guimarães et al // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. – 2018. – Vol. 22, № 6. – P. 418-423. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p418-423>. (In English).
12. Khazimov K.M. Intensifikatsiya protsessa sushki produktov rastitel'nogo proiskhozhdeniya s ispol'zovaniem solnechnoi ehnergii // Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni doktora filosofii (PhD), Kazakhskii natsional'nyi agrarnyi universitet, Almaty. 2015 http://www.kaznau.kz/page/dissovet/dissovet_2015/diss_khazimov.pdf. (In Russian).
13. Recundo-Cuenca A. Soybean seeds and its by-product okara as sources of dietary fibre / A. Recundo-Cuenca, MJ Villaneuva-Suárez, I. Mateos-Aparicio // Measurement by AOAC and Englyst methods. Food Chem. – 2008. – № 108. – R. 1099-1105. (In English).
14. Verfel, D.B. Poluchenie soevogo masla i shrota: per. s angl.; pod red. V.V. Klyuchkina, M.L. Domoroshchenkovoi / D.B. Verfel, N.KH. Vitt. – М.: Kolos, 2014. – 81 s. (In Russian).

15. Hamdami N. Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures / N. Hamdami, J.Y. Monteau, A. Le Bail // Part 2: Evaluation of the effective moisture diffusivity from drying data. Journal of Food Engineering. – 2004. – № 62. – R. 385-392. (In English).
16. Njie D.N. Thermal properties of cassava, yam and plantain / D.N. Njie, T.R. Rumsey, R.P. Singh // Journal of Food Engineering. – 1998. – № 37. – R. 63-76. (In English).
17. Domoroshchenkova M.L. Sovremennye tekhnologii polucheniya pishchevykh belkov iz soevogo shrota / M.L. Domoroshchenkova // Pishchevaya prom-st'. – 2001. – № 4. – S. 6-10. (In Russian).
18. Enkina V.B. Soya / V.B. Enkina. – M.: Kolos, 1970. (In Russian).
19. Pat. 37358 Respublika Kazakhstan. MPK F26B 3/02, F26B 9/06, F26B 21/00, F26B 23/00. Tekhnologicheskaya ustanovka dlya sushki okary / Khazimov M.ZH., Pogulyaev A.D., Khazimov K.M., Niyazbaev A.K., Sadykova A.K. – Zayavl. 13.03.2024; opubl. 19.09.2025, Byul. № 38. – URL: <https://gosreestr.kazpatent.kz/Invention/Details?docNumber=393987>. (In Russian).
20. Igan ZH.P. Soya! Soya! Soya! Velikolepnye retsepty zdorovogo pitaniya: per. s angl. S. Kholodnova // ZH.P. Igan. – M.: FAIR-PRESS, 2002. – 160 s. (In Russian).
21. Sadykova A.K. Opredelenie deformatsionnykh kharakteristik sovoi okary / A.K. Sadykova, A.K. Niyazbaev, A.M. Kaliev // Tekhniko-tehnologicheskoe obespechenie innovatsii v agropromyshlennom komplekse. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Melitopol', 2024. – S. 264-268. (In Russian).

А.Қ. Садықова^{1*}, А.К. Ниязбаев², М.Ж. Хазимов^{1,2}

¹Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Байтұрсынұлы көшесі, 126/1 үй

²Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті,
050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Абай даңғылы, 8 үй

*e-mail: ai.sadykova@au.es.kz

СОЯ ОКАРАСЫНЫҢ ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ҚҰЙЫНДЫҚ КЕПТІРУДІҢ ЖЫЛУ ҮДЕРІСІНЕ ӘСЕРІ

Бұл жұмыста соя окарасының әртүрлі ылғалдылық жағдайларындағы деформациялық қасиеттері СТ-2 құрылымометрінің көмегімен зерттелді. Үлгілердегі ылғал мөлшеріне байланысты абсолюттік деформация, салыстырмалы деформация, механикалық кернеу және серпімділік модулінің тәуелділіктері анықталды. Абсолюттік деформация 28% ылғалдылықта 4,33 мм-ден 76% кезінде 17,04 мм-ге дейін, ал салыстырмалы деформация – 0,072-ден 0,284-ке дейін өзгерді. Серпімділік модулі 28% ылғалдылықта 6815 г/см²-ден 76% кезінде 1729 г/см² аралығында болды. ылғалдылық 40-56% болғанда бөлшектердің механикалық тұрақтылығы мен жылуөткізгіштіктің қарқындылығының оңтайлы үйлесімі қалыптасатыны анықталды, бұл меншікті энергия шығынын 8-12% төмендетіп, жылулық режимнің тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Абсолюттік және салыстырмалы деформация, механикалық кернеу және серпімділік модулінің анықталған тәуелділіктері құйындық кептірудің ұтымды режимдерін негіздеуге мүмкіндік береді және тағамдық материалдарды сусыздандырудың жылуэнергетикалық үдерістерінде практикалық маңызға ие. Деформациялық сипаттамалар құйындық кептіру кезіндегі энергия шығынымен тікелей байланысты екені көрсетілді, бұл жылу-масса алмасудың біркелкілігіне және жылу энергиясын пайдалану тиімділігіне әсер етеді. Алынған нәтижелер құйындық кептіру режимдерін есептеу, жылу-масса алмасу үдерістеріндегі энергия шығынын азайту және энергия үнемдейтін кептіру қондырғыларын жобалау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: құйындық кептіру, энергия тиімділігі, деформациялық қасиеттер, жылуөткізгіштік, соя окарасы, СТ-2 құрылымометры.

A.K. Sadykova^{1*}, A.K. Niyazbaev², M.Zh. Khazimov^{1,2}

¹Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baitursynuly Street, Building 126/1

²Kazakh National Agrarian Research University,
050010, Republic of Kazakhstan, Almaty, Abay Avenue, Building 8

*e-mail: ai.sadykova@au.es.kz

STUDY OF THE DEFORMATION PROPERTIES OF SOY OKARA AND THEIR INFLUENCE ON THE HEAT PROCESS OF VORTEX DRYING

The deformation properties of soy okara at various moisture contents were studied using a Structurometer ST-2. The dependencies of absolute deformation, relative deformation, mechanical stress, and

modulus of elasticity on moisture content in the samples were established. The absolute deformation varied from 4.33 mm at 28% moisture to 17.04 mm at 76%, while relative deformation ranged from 0.072 to 0.284 under the same conditions. The modulus of elasticity ranged from 6815 g/cm² at 28% moisture to 1729 g/cm² at 76%. It was shown that at a moisture content of 40-56%, an optimal combination of particle mechanical stability and heat transfer intensity is achieved, resulting in an 8-12% reduction in specific energy consumption and improved thermal stability. The obtained dependencies of absolute and relative deformation, mechanical stress, and modulus of elasticity make it possible to justify rational vortex drying modes, which are practically significant for thermal energy processes of food material dehydration. It was demonstrated that deformation characteristics are directly related to energy consumption during vortex drying, affecting the uniformity of heat and mass transfer and the efficiency of heat utilization. The obtained results can be used to calculate vortex drying parameters, reduce energy consumption in heat and mass transfer processes, and design energy-efficient drying units.

Key words: vortex drying, energy efficiency, deformation properties, heat transfer, soy okara, Structurometer ST-2.

Сведения об авторах

Айкүміс Қанатқызы Садықова* – докторант кафедры «Теплоэнергетика» Алматинского университета энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Республика Казахстан; e-mail: ai.sadykova@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9896-4822>.

Адилхан Кизатоллинович Ниязбаев – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Машиноиспользование» имени И.В. Сахарова Казахского национального аграрного университета, Республика Казахстан; e-mail: adil77@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6753-5489>.

Марат Жалелович Хазимов – кандидат технических наук, профессор-преподаватель кафедры «Теплоэнергетика» Алматинского университета энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, профессор кафедры «Машиноиспользование» имени И.В. Сахарова Казахского национального аграрного университета, Республика Казахстан; e-mail: mkhazimov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5448-3122>.

Авторлар туралы мәліметтер

Айкүміс Қанатқызы Садықова* – Г. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетінің «Жылуэнергетика» кафедрасының докторанты, Қазақстан Республикасы; e-mail: ai.sadykova@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9896-4822>.

Адилхан Кизатоллинович Ниязбаев – PhD, И.В. Сахаров атындағы Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университетінің «Машина пайдалану» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: adil77@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6753-5489>.

Марат Жалелович Хазимов – техника ғылымдарының кандидаты, Г. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетінің «Жылуэнергетика» кафедрасының профессор-оқытушысы, И.В. Сахаров атындағы Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университетінің «Машина пайдалану» кафедрасының профессоры, Қазақстан Республикасы; e-mail: mkhazimov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5448-3122>.

Information about the authors

Aikumis Kanatkyzy Sadykova* – Doctoral student of the Department of Thermal Power Engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Republic of Kazakhstan; e-mail: ai.sadykova@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9896-4822>.

Adilkhan Kizatollinovich Niyazbayev – PhD, Associate Professor of the Department of Machine Utilization named after I.V. Sakharov, Kazakh National Agrarian Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: adil77@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6753-5489>.

Marat Zhalelovich Khazimov – Candidate of Technical Sciences, Professor-Lecturer of the Department of Thermal Power Engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, and Professor of the Department of Machine Utilization named after I.V. Sakharov, Kazakh National Agrarian Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: mkhazimov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5448-3122>.

Поступила в редакцию 27.10.2025
Поступила после доработки 28.01.2026
Принята к публикации 30.01.2026