

РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 691.18:699.86:536.21

ИНДЮШИНЫЙ ПУХ В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ: ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И СОРБЦИОННОЙ ВЛАЖНОСТИ

А.А. Бакатович, Н.В. Бакатович, В.Н. Шекиладзе

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,

г. Новополоцк, Республика Беларусь

e-mail: a.bakatovich@psu.by, n.bakatovich@psu.by, v.n.shekiladze@students.psu.by

В статье анализируется перспектива использования индюшиного пуха в качестве материала для тепловой изоляции. Определены коэффициенты теплопроводности и показатели сорбционной влажности индюшиного пуха. По итогам исследований получен утеплитель на основе структурообразующего материала из индюшиного пуха плотностью 21,3-42,7 кг/м³, обеспечивающий коэффициент теплопроводности на уровне 0,032–0,037 Вт/(м·°С).

Ключевые слова: индюшиный пух, теплоизоляционный материал, плотность, коэффициент теплопроводности, сорбционная влажность.

TURKEY DOWN AS THERMAL INSULATION: STUDIES OF THE COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY AND SORPTION HUMIDITY

A. Bakatovich, N. Bakatovich, V. Shekiladze

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Republic of Belarus

e-mail: a.bakatovich@psu.by, n.bakatovich@psu.by, v.n.shekiladze@students.psu.by

This article analyzes the potential of turkey down as a thermal insulation material. Thermal conductivity coefficients and moisture sorption capacity of turkey down were determined. The results of the study resulted in the production of an insulating material based on turkey down as a structure-forming material, with a density of 21,3-42,7 kg/m³ and a thermal conductivity coefficient of 0.032–0,037 W/(m °C).

Keywords: turkey down, thermal insulation material, density, coefficient of thermal conductivity, sorption humidity.

Введение. Крупнейшим производителем и экспортёром индейки в мире являются Соединенные Штаты. По данным USDA, в 2024 году выпуск мяса индейки составил около 2322,82 тысяч тонн. Крупнейшими штатами-производителями индейки являются Миннесота, Северная Каролина, Арканзас, Индиана, Миссури, Вирджиния, Айова и Пенсильвания [1].

Россия является второй страной по производству индюшиного мяса. Количество произведенного мяса индейки составляет 438 тысяч тонн за 2024 год [2]. Если рассматривать страны СНГ, такие как Кыргызстан, Узбекистан, Казахстан и Беларусь, то производство мяса индейки демонстрирует устойчивое развитие, но в гораздо меньших объемах. За 2024 год в Беларуси отмечается значительный рост производства индейки, ставшего одним из ключевых направлений развития агропромышленного комплекса страны. По данным Минсельхозпроды выпуск индюшиного мяса составил 13,1 тыс. т, что больше на 35,1%, по сравнению с 2023 [3].

С ростом производства мясной продукции, соответственно увеличиваются объемы полученного индюшиного пера, и возникает проблема утилизации перьевых отходов. Учитывая растущий спрос на экологические материалы в промышленности, можно использовать перо, как уникальный, возобновляемый, природный ресурс для различных производств. Рациональное потребление выгодно, как с экологической, так и с экономической точки зрения. Перо, считавшееся отходом производства, превращается в ценную продукцию и открывает новые области применения.

Строительная отрасль также нуждается в экологических материалах, повышающих качество и удешевляющих строительство. Перья могут использоваться для теплоизоляции, за счёт низкой теплопроводности, благодаря наличию в структуре воздушных прослоек [4].

Имеются сведения об исследованиях, разработках и оценках потенциала использования новых материалов на основе отходов пера. В Великобритании использовали перья с птицеводческого предприятия для получения тепловой изоляции. Перед началом испытаний загрязнённые куриные перья тщательно промывали в 5% растворе перекиси водорода и высушивали. Затем перья перерабатывали до состояния коротких перьевых волокон, пригодных для дальнейшей переработки. Структура материала создавалась методом аэродинамической укладки. Волокна перьев смешивались с бикомпонентным связующим волокном для формирования смеси в соотношении 9:1 (по массе). Бикомпонентное волокно имело полиэтиленовую поверхность и полипропиленовую сердцевину. Смесь волокон подавалась на движущуюся сетку, проходила под нагревательным колпаком, при температуре 145°C, где бикомпонентные волокна частично плавилась, связывая перьевые волокна в единое нетканое полотно. По результатам испытаний, при плотности 30–70 кг/м³, коэффициент теплопроводности соответствовал 0,036–0,04 Вт/(м·°C) [5].

Ученые из Institute of Analytical Sciences and Physico-Chemistry for Environment and Materials совместно с Institute of Wood Sciences and Furniture разработали трёхслойные древесностружечные плиты, плотностью 660 кг/м³ и размерами 320 × 320 мм, с толщиной 16 мм, где 5% древесной щепы в среднем слое заменены цельными утиными перьями без предварительной обработки. Для проверки совместимости связующих с утиными перьями, состоящими из кератина, использовали 3 вида смол: мочевино-формальдегидную (UF), полимерный дифенилметандиизоцианат (pMDI) и полимерный дифенилметандиизоцианат (PVAc). По результатам исследования выявлено, что древесностружечные плиты с покрытием pMDI после 24-часового погружения в воду подтвердили стойкость к водопоглощению, разбухнув только на 7%, благодаря лучшей совместимости между смолой и кератином пера. В то же время, как образцы с PVAc разбухли на 44%. С добавлением утиных перьев коэффициент теплопроводности снизился на 10%, до 0,09 Вт/(м·°C). Кроме того, в ДСП с добавлением перьев улучшилось звукопоглощение в диапазоне 2500–5000 Гц [6].

Таким образом можно констатировать, что в настоящее время ведутся исследовательские работы по применению птичьего пера в качестве структурообразующего сырья для тепловой изоляции и данная тематика исследований является актуальной.

Методы испытаний. Определение коэффициента теплопроводности пуха проводили на приборе ИТП-МГ4, с размерами образцов 250 × 250 × 30 мм. Образцы индюшиного пуха, предварительно высушенные до абсолютно сухого состояния, равномерно закладывали в камеру прибора и фиксировали крышку.

Среднюю плотность составов определяли в соответствии с ГОСТ 17177–94. Для определения массы составов использовали весы настольные электронные ВНЭм-35.

Сорбционную влажность проб индюшиного пуха определяли эксикаторным методом. Для испытаний использовали образцы массой 1 г, предварительно высушенные до абсолютно

сухого состояния, при температуре $(60 \pm 5) ^\circ\text{C}$, до достижения постоянной массы. Высушенные образцы помещали в стеклянные бюксы и в эксикаторы, предварительно в эксикаторах создавали стабильные условия влажности воздуха, за счёт насыщенных растворов серной кислоты.

Испытания проводились при пяти значениях показателя относительной влажности воздуха: 40%, 60%, 80%, 90% и 97%, и температуре $(20 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$. Влажность образцов определяли путем взвешивания через каждые 5 дней с целью обеспечения точного мониторинга изменения массы и содержания влаги в образцах в процессе сорбции, до достижения образцами постоянной массы на лабораторных технических весах МЛ 1,5 В1ЖА «Ньютон».

Процесс сорбции считался завершённым, когда масса образцов в двух последовательных взвешиваниях оставалась постоянной или начинала снижаться.

Экспериментальная часть. В лаборатории теплоизоляционных материалов Полоцкого государственного университета, проводятся комплексные исследования, направленные на получение тепловой изоляции на основе птичьего пера. Исходным сырьем является индюшиный пух, отобранный на птицефабрике «Городок», расположенной в д. Суравни Городского района Витебской области, специализирующейся на промышленном выращивании индеек. На рисунке 1 представлена проба индюшиного пуха.

В ходе исследований определена теплопроводность индюшиного пуха, не содержащего вяжущее вещество. При варьировании плотности в пределах $3,2\text{--}19,2 \text{ кг/м}^3$ коэффициент теплопроводности изменяется в диапазоне от $0,031$ до $0,067 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ [7].



Рисунок 1. – Проба индюшиного пуха

Особое внимание в исследованиях уделено изучению сорбционной влажности индюшиного пуха, так как данная характеристика напрямую связана с долговечностью. При повышенной относительной влажности вода адсорбируется на поверхности пуха, что приводит к увеличению коэффициента теплопроводности, деформации структуры, уменьшению механической прочности, а также развитию плесневых грибов, вызывающих биоразрушение материала [8].

Полученные значения сорбционной влажности индюшиного пуха использовали для построения изотермы сорбции водяного пара (рисунок 2). Анализ изотермы сорбции показывает, что индюшиный пух при проведении опыта демонстрирует зависимость возрастания сорбционной влажности при повышении относительной влажности воздуха. В диапазоне относительной влажности воздуха 40% и 60% значения сорбционной влажности изменяются незначительно, находясь в пределах 5,7% и 6,3%, что указывает на низкую сорбцию образцов. При повышении относительной влажности воздуха до 80%, влажность возрастает до 7,9% т.е. на 37,3%, в сравнении с образцом при относительной влажности воздуха 40% и на 25,2%, для

образцов при относительной влажности воздуха 60%. Резкое увеличение показателя до 13,8% наблюдается при относительной влажности воздуха 90%. Наибольшее значение сорбции водяного пара, равное 24,8% зафиксировано при относительной влажности воздуха 97%.



Рисунок 2. – Изотерма сорбции водяного пара индюшиного пуха

Причина значительного увеличения сорбционной влажности, при относительной влажности воздуха 90% и 97% индюшиного пуха, обусловлена содержанием белковой структуры из кератина, которая активно притягивает и связывает молекулы воды.

Параллельно с определением сорбционной влажности исследовали стойкость индюшиного пуха к появлению плесневых грибов, что является одним из важных параметров долговечности тепловой изоляции (рисунок 3). На 60 суток, при относительной влажности воздуха 90 и 97%, в эксикаторах, на образцах пуха зафиксировано появление плесневых грибов.



Рисунок 3. – Проба индюшиного пуха, пораженная плесневым грибом

Полученные результаты указывают на возможность использования индюшиного пуха в качестве тепловой изоляции, но при условии отсутствия повышенной относительной влажности воздуха 90% и более, и предотвращения возможности попадания воды на поверхность пуха.

С целью устранения негативного влияния повышенной относительной влажности воздуха и воды на пух, а также получения тепловой изоляции в виде матов использовали сшитую оболочку из гидро-ветрозащитной мембраны. В качестве структурообразующего материала в оболочке применяли индюшиный пух массой 25–65 г. Оболочка из гидро-ветрозащитной мембраны, имеет размеры 250 × 250 × 30 мм. Внутри оболочки вшиты две перегородки, обеспечивающие равномерность распределения пуха и поддержания геометрической формы образца (рисунок 4). Масса оболочки из мембраны без пуха составляла 15 г.



Рисунок 4. – Образец утеплителя с оболочкой из гидро-ветрозащитной мембраны, с наполнением индюшиным пухом

После закладки пуха, полученный образец утеплителя помещали в сушильный шкаф и выдерживали при температуре 50–60°C, для удаления остаточной влаги. По результатам исследований построена зависимость изменения коэффициента теплопроводности от плотности (рисунок 5).

При массе пуха 25 г (состав 1) плотность материала составила 21,3 кг/м³, коэффициент теплопроводности равен 0,037 Вт/(м·°C). Увеличение плотности структурообразующего материала в 1,3 раза, до 26,7 кг/м³, обеспечило понижение коэффициента теплопроводности на 5,4%. При массе пуха 45 г (состав 3) плотность достигала 32 кг/м³ и наблюдалось дальнейшее снижение коэффициента теплопроводности до 0,032 Вт/(м·°C), что является минимальным значением среди исследуемых составов. Повышение плотности до 37,3 кг/м³, при расходе пуха 55 г не повлекло значительных изменений коэффициента теплопроводности, равного 0,033 Вт/(м·°C). Дальнейшей рост плотности материала достиг 42,7 кг/м³, вызывая повышение коэффициента теплопроводности на 9,4%, относительно состава 3, до значения 0,035 Вт/(м·°C).

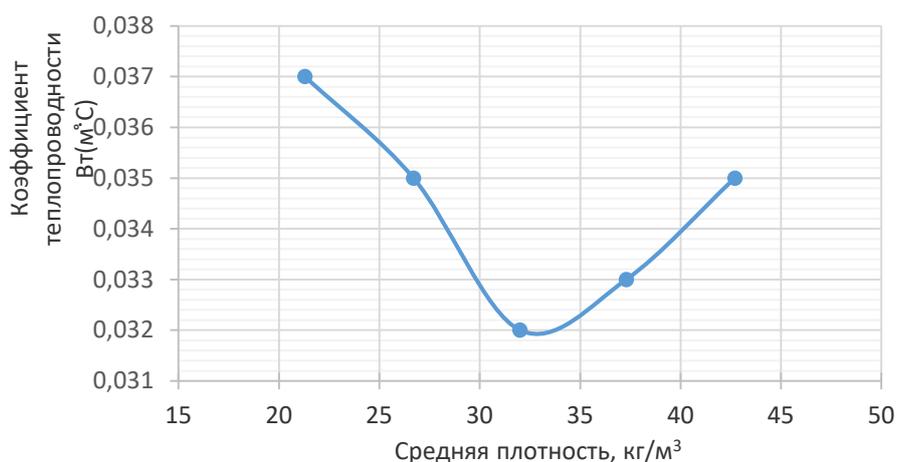


Рисунок 5. – Зависимость изменения коэффициента теплопроводности от средней плотности

Результаты исследований показали, что для индюшиного пуха, как для утеплителя в оболочке, так и в чистом виде, существует зависимость изменения коэффициента тепло-

проводности от плотности материала. При возрастании плотности до определенного значения, коэффициент теплопроводности снижается, за счет постепенного формирования структуры с замкнутыми микропустотами, блокирующими прохождение тепловых потоков воздуха. Использование гидро-ветрозащитной мембраны, состоящей из полимерных волокон, способствует защите структурообразующего материала из индюшиного пуха при воздействии внешних факторов, включая водяные пары из воздуха от конденсата, образующегося при перепаде температур, что положительно сказывается на эксплуатационных свойствах материала. Мембрана предотвращает увлажнение и выветривание утеплителя, сохраняет форму и целостность структурообразующего материала.

Заключение. На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Исследование сорбционных свойств показало, что индюшиный пух обладает достаточно высокой сорбционной способностью при повышенной относительной влажности воздуха. Максимальная сорбционная влажность достигает 24,8% при относительной влажности воздуха 97%. В связи с этим индюшиный пух целесообразно использовать со связующим компонентом, который понижает сорбцию влаги из воздуха или использовать защитную оболочку в виде гидро-ветрозащитной мембраны.

2. Применение индюшиного пуха в качестве структурообразующего материала для утеплителя с оболочкой из гидро-ветрозащитной мембраны позволило получить образцы с низким коэффициентом теплопроводности 0,032 Вт/(м·°С), при плотности 32 кг/м³.

ЛИТЕРАТУРА

1. U.S. Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service. (2025). Poultry – Production and Value 2024 Summary (April 2025). ISSN: 1949-1573.
2. Рейтинг крупнейших производителей индейки в РФ в 2024 году [Электронный ресурс] / сайт «agromics.ru». – Режим доступа: <https://agromics.ru/novosti/rejting-indeyka/>. – Дата доступа: 10.11.2025.
3. Как Беларуси и России удается наращивать объемы производства индейки [Электронный ресурс] / сайт «mlyn.by». – Режим доступа: https://mlyn.by/10032025/kak-belarusi-i-rossii-udaetsya-narashhivat-obemy-proizvodstva-indejki/?utm_source=chatgpt.com/. – Дата доступа: 12.11.2025.
4. Пух, пухоперовые смеси [Электронный ресурс] / сайт «forma-odezhda.com». – Режим доступа: <https://forma-odezhda.com/encyclopedia/puh-puhoperovye-smesi/>. – Дата доступа: 12.11.2025.
5. Dieckmann, E., Onsiong, R., Nagy, B. et al. Valorization of Waste Feathers in the Production of New Thermal Insulation Materials. Waste Biomass Valor 12, 1119–1131 (2021).
6. Raydan, N.D.V., Charrier, B., Kowaluk, G., Robles, E. Preparation and Characterization of Particleboard Made from Industrial-Type Wood Particles and Discarded Duck Feathers. J. Compos. Sci. 2024, 8, 241.
7. Бакатович, А. А. К вопросу применения птичьего пера в качестве тепловой изоляции / А. А. Бакатович [и др.] // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: электрон. сб. ст. V Междунар. науч. конф., Новополоцк, 27 окт. 2023 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой; Редкол.: Д. Н. Лазовский (председ.) [и др.]. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2024. – С. 321-324.
8. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – М.: АВОКПРЕСС, 2006. – 252 с.