

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2153>

***А. С. Төлебиев¹, М. С. Исатаев²,
Б. Ж. Бектібай³, М. С. Артыков⁴**

^{1,2,3,4}Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5375-3193>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8248-670X>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6411-8049>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9143-2349>

*e-mail: Aalisher_93@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ СЕКЦИОНИРОВАННОЙ ВОЗДУХОПОЛНЕННОЙ ПЛЁНКИ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

Энергоэффективность тепличных сооружений в значительной степени определяется теплоизоляционными свойствами ограждающих конструкций, среди которых полиэтиленовые покрытия остаются наиболее распространёнными благодаря доступности и технологичности. Однако традиционные двойные плёночные системы ограничены нестабильностью воздушного слоя и высоким уровнем конвективных потерь. В данной работе исследуются теплоизоляционные характеристики новой секционированной воздухополненной конструкции, в которой воздушная прослойка разделена на независимые камеры, препятствующие циркуляции воздуха и формирующие устойчивый тепловой барьер. Экспериментальная установка включала двухслойную полиэтиленовую систему с заданной геометрией камер, тепловой нагнетатель и пирометрическую систему контроля. Было проведено измерение температурных профилей и расчёт теплового потока через плёночное ограждение. Полученное значение коэффициента теплопередачи составило $U=3,48 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, что существенно ниже, чем у стандартного одинарного полиэтилена, и сопоставимо с характеристиками 8–10-миллиметрового многокамерного поликарбоната. Результаты подтверждают, что секционирование воздушного слоя эффективно подавляет макроконвекцию и обеспечивает повышение термического сопротивления без существенного увеличения

массы и стоимости конструкции. Отмечено, что лабораторные условия не учитывают воздействие ветра, солнечной радиации и осадков, поэтому для окончательной оценки необходимы полевые испытания. Дополнительно предложено применение CFD-моделирования для прогнозирования поведения воздушных камер в различных климатических сценариях и оптимизации геометрии секций. Проведённое исследование демонстрирует высокий потенциал секционированной воздухонаполненной плёнки как доступного и энергоэффективного решения для тепличных покрытий нового поколения.

Ключевые слова: секционированная плёнка, воздухонаполненный слой, теплопередача, коэффициент теплопередачи, полиэтиленовое покрытие, энергоэффективные ограждающие конструкции.

Введение

В условиях роста стоимости энергоресурсов и усиления требований к снижению выбросов парниковых газов особую актуальность приобретает задача повышения энергоэффективности ограждающих конструкций в сельском хозяйстве, строительстве и других отраслях. Одним из наиболее доступных и широко применяемых материалов являются полимерные плёнки, в частности полиэтиленовые покрытия, которые используются в теплицах, временных укрытиях, складских и производственных сооружениях. Их преимущества – низкая стоимость, малый вес, простота монтажа и возможность адаптации оптических и механических характеристик за счёт многослойных структур и модифицирующих добавок [1].

Обзор исследовательских работ [2;3;4] показали, что энергетические характеристики в таких конструкциях определяет не сама плёнка, а то, как мы организовали воздушное пространства между её слоями. Это воздушное пространство способно заметно уменьшить теплопередачу – примерно на 20–40 %. Но эффект появляется не автоматически. Он зависит от геометрии зазора, устойчивости воздушного слоя и того, насколько хорошо конструкция удерживает воздух в заданной форме.

Эксперименты, проведённые в Южной Корее [5], дали показательный результат: теплица с надувной воздушной прослойкой теряла меньше тепла, чем обычная конструкция с двойной плёнкой. Но у такого решения есть свои минусы – микроклимат внутри требует более точной вентиляции. Исследование [6] подтверждает ту же логику: воздушный зазор между слоями полиэтилена работает в двух режимах – летом усиливает испарительное охлаждение, зимой снижает теплопотери. Значит, решает не просто наличие воздуха, а его структура, устойчивость и поведение внутри плёночного ограждения.

В двойных и многослойных пластиковых покрытиях воздушный зазор работает эффективно только при одном условии – он должен быть стабильным. Под ветровой нагрузкой обычная двойная плёнка начинает вести себя как мембранный насос – колеблется, «дышит» и запускает неконтролируемую циркуляцию воздуха внутри зазора [7]. Из-за этого теплоизоляция быстро теряет расчётную эффективность, а фактический U-value часто оказывается выше ожидаемого. Поэтому для энергосберегающей плёночной конструкции недостаточно просто создать воздушную прослойку. Её нужно зафиксировать, удержать в заданной геометрии и не дать воздуху свободно перемещаться между слоями.

Параллельно развиваются и многослойные плёнки. Здесь уже важен не только сам полиэтилен, а то, как устроены слои внутри материала. В работе [8] авторы рассматривают трёхслойную плёнку LDPE/EVA/LDPE: между слоями помещён расширенный полимер с воздушными пузырьками. За счёт такой структуры покрытие становится прочнее, лучше выдерживает песок, ветер и дольше служит в жарком, пыльном климате. По сути, эти данные показывают простую вещь, если правильно организовать пространство между слоями, можно заметно повысить и теплоизоляцию, и механическую устойчивость плёнки.

Заметный шаг в этом направлении связан с патентами [9;10;11]. В них предложена идея многослойной плёнки, где слои можно разделять, а воздух удерживается в отдельных независимых камерах. Такая конструкция помогает сохранить стабильный внутренний объём: ветер уже не так сильно влияет на форму покрытия, а движение воздуха внутри становится слабее. Но есть один пробел. В патентах хорошо описано само инженерное решение, однако почти нет данных о том, как такая плёнка ведёт себя с точки зрения теплопередачи. Именно поэтому эта тема остаётся открытой для научного исследования. При этом сама идея секционирования воздуха выглядит перспективной: она может повысить теплоэффективность покрытия без сильного усложнения конструкции.

Изучение вышеуказанных работ исследователей показывает, что двухслойная полиэтиленовая плёнка с воздушным зазором действительно уменьшает теплопотери. Но работает она не всегда стабильно. Воздух между слоями может начать свободно перемещаться, плёнка деформируется от ветра, а эффективность сильно зависит от давления внутри покрытия. В итоге теплоизоляция получается неравномерной: в одних местах барьер сохраняется лучше, в других – заметно слабее. Поэтому сейчас всё больше внимания уделяют более устойчивым конструкциям, где воздушный слой не

просто находится между плёнками, а имеет чёткую структуру и сохраняет свои свойства при изменении погодных условий.

Эти выводы подводят к идее исследованию и разработке секционированной воздушнонаполненной плёнки. В такой системе воздух перемещается не одним общим слоем между двумя полотнами, а находится в отдельных ячейках. Это меняет поведение покрытия. Воздух не перетекает к краям, плёнка меньше «играет» от ветра, тепловое сопротивление становится стабильнее, а теплоизоляция распределяется по поверхности ровнее. Есть и ещё один плюс: в отдельных секциях можно регулировать внутреннее давление. Теоретически такая плёнка может приблизиться к поликарбонату по теплоизоляционным свойствам, но при этом остаться легче и дешевле.

Анализ современных научных работ и патентных решений показывает, что в мировой практике ещё не существует серийных систем, сочетающих простоту полиэтилена и структурированность многосекционных теплоизолирующих материалов. Это создаёт научное обоснование и технологическую нишу для разработки новой конструкции секционированной воздушнонаполненной плёнки. Секционированная воздушнонаполненная плёнка может стать основой для лёгкого, недорогого теплоизолирующего материала и полезного для снижения теплопотерь в теплицах и других инженерных сооружениях.

Материалы и методы

Для эксперимента мы взяли полиэтиленовую плёнку высокого давления толщиной 150 мкм. Такой материал часто используют в теплицах: он достаточно прочный, прозрачный и недорогой. На его основе мы собрали многокамерную конструкцию, показанную на рисунке 1. Две плёночные поверхности соединили так, чтобы между ними появился не общий воздушный зазор, а устойчивый секционированный слой воздуха.

Чтобы форма конструкции не менялась, а воздух внутри не начинал свободно перемещаться, мы разделили пространство на отдельные секции размером 50 см × 50 см. Эти секции мы называли «энергосберегающими пакетами». Такой размер выбрали не случайно: он близок к реальным условиям плёночных теплиц и удобен для лабораторного испытания. Плёнку спаивали портативным термосварочным аппаратом. Он давал ровный прогрев и позволял получить герметичный шов. Для подачи воздуха мы оставили небольшие технологические отверстия под диаметр нагнетателя. Соединения между камерами дополнительно закрыли алюминиевым скотчем с металлическим напылением. Это решало сразу две задачи: повышало герметичность и позволяло пирометру точнее фиксировать температуру поверхности, не «просвечивая» через плёнку.

Чтобы создать тепловой поток и хоть как-то приблизиться к условиям теплицы с двойной плёнкой и наддувом, мы использовали обычный фен Xiaomi Showsee A1-W мощностью 1800 Вт. Он работал в режиме непрерывного горячего обдува, разогревая воздух примерно до 57°C и разгоняя поток до 12–19,7 м/с. Фен закрепили на специальной подставке – важно было зафиксировать положение и направить поток точно в первую секцию конструкции. В итоге устройство выполняло сразу две задачи. С одной стороны, оно создавало разницу температур между «внутри» и «снаружи». С другой – запускало движение воздуха по камерам, имитируя ту самую систему наддува, которую используют в обычных тепличных покрытиях.

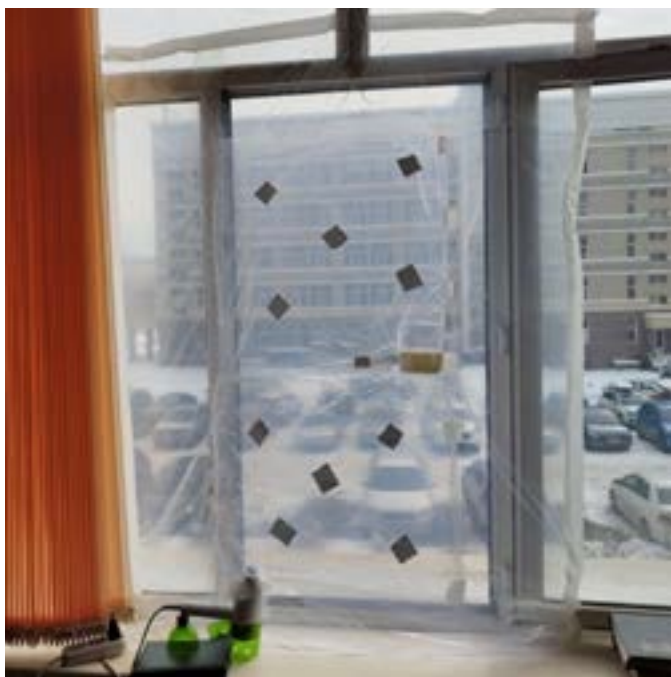


Рисунок 1 – Двухслойная полиэтиленовая конструкция с секционированным воздушным слоем

Температуру мы снимали пирометром Crown СТ44036 с оптическим разрешением 12:1, коэффициентом излучения 0,95 и погрешностью около $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Чтобы получить более реальные данные, в ключевых точках на плёнке наклеили алюминиевые маркеры – они хорошо отражают излучение,

и прибор считывает температуру заметно стабильнее. Параллельно мы контролировали температуру воздуха – внутри и снаружи – обычными ртутными термометрами. Условия эксперимента задали максимально приближённые к реальности: в помещении около 18 °С, снаружи от –9 до –5 °С, влажность держалась на уровне 75 %, давление – 771 мм рт. ст., северный ветер 2–3 м/с. Саму конструкцию герметично установили в оконный проём. По сути, он и стал границей между тёплым и холодным объёмами, за счёт чего тепловой поток распределялся так, как это происходит в реальных условиях.

Температуру мы фиксировали каждые две минуты в трёх точках: там, где горячий воздух входит в первую секцию, на переходе между секциями и на выходе потока. Так стало видно, как температура меняется по всей конструкции и в какой момент система выходит на устойчивый режим. Когда значения переставали заметно меняться, эксперимент завершали. Затем мы обрабатывали данные: для каждой точки брали все измерения за стационарный период и находили среднее арифметическое.

Для оценки теплоизоляции мы использовали коэффициент теплопередачи, или U-value. Это удобный показатель: он показывает, сколько тепла проходит через 1 м² покрытия при разнице температур в 1 °С. Логика простая. Чем ниже U-value, тем меньше теплопотери. Значит, плёнка лучше удерживает тепло и работает эффективнее как энергосберегающее покрытие.

Для сравнения в таблице 1 мы привели типичные значения U-value для распространённых тепличных покрытий. Эти данные хорошо показывают, что просто добавить второй слой плёнки недостаточно. Если воздушный зазор не зафиксирован, внутри начинается движение воздуха, и часть тепла всё равно быстро уходит наружу.

Таблица 1 – Типичные значения коэффициента теплопередачи (U-value) для различных тепличных покрытий

Тип покрытия	Структура	U-value, Вт/(м ² ·°С)
Одинарная полиэтиленовая плёнка	Однослойная	6,0-7,0
Двойная полиэтиленовая плёнка (без наддува)	Два слоя, свободный воздушный зазор	4,2-4,5
Двойная полиэтиленовая плёнка с наддувом	Стабилизированный воздушный слой	3,3-3,7
Сотовый поликарбонат	Двухслойный	3,0-3,3
Трёхслойные многокамерные панели (поликарбонат)	3–5 камер	1,7-2,5

Используя U-value, мы смогли напрямую сравнить нашу секционированную плёнку с привычными материалами. Так стало понятно, насколько она близка по характеристикам к поликарбонату и есть ли реальное преимущество перед обычной полиэтиленовой плёнкой. Дальше всё считали уже на основе эксперимента. Взяли измеренный температурный градиент, учли реальный тепловой поток – и по этим данным получили коэффициент теплопередачи. Такой подход даёт более честное сравнение, без догадок и упрощений.

Выбранная методика сочетает эксперимент, измерения приборами и последующую обработку теплотехнических данных. За счёт этого мы смогли не просто зафиксировать температуры, а увидеть, как именно тепло проходит через секционированную воздушнонаполненную плёнку. Такой подход даёт данные, близкие к практическим условиям. Поэтому исследуемую конструкцию можно сравнить с обычной одинарной и двойной плёнкой, покрытиями с наддувом воздуха и многокамерным поликарбонатом. Это помогает понять, есть ли у такой плёнки реальный потенциал как у энергоэффективного покрытия для теплиц.

Результаты и обсуждение

Во время эксперимента мы поэтапно измеряли температуру в трёх местах: на входе тёплого воздуха в первую камеру, на переходе во вторую секцию и на выходе из двухслойного пакета. Замеры делали каждые две минуты в течение 30 минут. Такой интервал позволил увидеть, как конструкция прогревается, где температура меняется быстрее, а где система постепенно выходит на устойчивый режим. Все полученные данные показаны на рисунке 2. На рисунке хорошо видно, как ведёт себя секционированная плёнка во время работы.



Рисунок 2 – Изменение температуры воздуха на входе, в промежуточной камере и на выходе из плёночного пакета

На входе в конструкцию горячий воздух держался в пределах 54–57°C. Это говорит о том, что нагнетатель работал достаточно стабильно. Дальше, при переходе во вторую камеру, температура снижалась до 42–46°C: часть тепла уже проходила через первый воздушный слой, и поток постепенно охлаждался. На выходе мы получили 31–40°C. Эти значения показывают, как сработали две воздушные прослойки вместе. По графику на рисунке 2 видно: входной поток немного колебался, но температура в переходной зоне и на выходе оставалась сравнительно ровной. Значит, внутри секционированной структуры сформировалось устойчивое тепловое сопротивление. Отдельные камеры не дают воздуху свободно перемещаться по всему пакету, как это часто бывает в обычной двойной плёнке, поэтому температура падает постепенно и более равномерно.

Когда система вышла на устойчивый режим, а температурные колебания стали минимальными, мы завершили серию измерений. Дальше оценивали, как работает опытный образец. Смотрели температуру подаваемого воздуха, значения в промежуточной зоне и итоговую температуру на выходе. Отдельно учли перепад между наружной и внутренней поверхностями плёночного покрытия. На основе средних экспериментальных данных построили схему распределения тепловых потоков, она показана на рисунке 3.

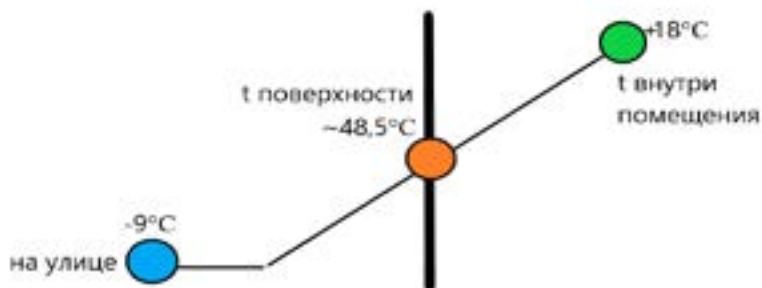


Рисунок 3 – Упрощённая модель теплового режима секционированного воздушнонаполненного пакета

Для наглядного представления характера охлаждения воздушного потока внутри конструкции была выполнена графическая реконструкция температурного маршрута. Полученная диаграмма отображает, как изменяется температура в каждой из камер и какую долю тепловой нагрузки поглощает каждая из них. Данные представлены на рисунке 4.

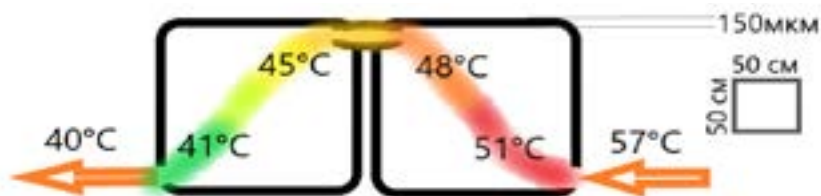


Рисунок 4 – Температурный маршрут движения воздуха через многокамерную плёночную систему

Для оценки теплотехнических характеристик конструкции были вычислены средние температуры на входе, в промежуточной зоне и на выходе плёночного пакета. Средние значения определялись как арифметические, по классической формуле:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \quad (1)$$

где $n = 15$ – количество измерений.

Средняя температура на входе:

$$T_{\text{ср.вх}} = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^n T_{\text{вх}} = 56,38^\circ\text{C}.$$

Средняя температура при переходе во вторую камеру:

$$T_{\text{ср.переход}} = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^n T_{\text{переход}} = 44,91^\circ\text{C}.$$

Средняя температура на выходе:

$$T_{\text{ср.вых}} = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^n T_{\text{вых}} = 37,68^\circ\text{C}.$$

Для последующего теплотехнического анализа использовалось среднее значение трёх температурных зон:

$$T_{\text{ср.вс}} = \frac{T_{\text{ср.вх}} + T_{\text{ср.переход}} + T_{\text{ср.вых}}}{3} = \frac{56,38 + 44,91 + 37,68}{3} = 46,32^\circ\text{C}.$$

Для расчёта U-value сначала нужно было определить, какой тепловой поток реально проходит через опытный пакет. В нашей схеме источник тепла один – нагретый воздух от фена-калорифера. Поэтому удельный тепловой

поток $q_{\text{эксп}}$ мы рассчитали через мощность нагнетателя и площадь плёночного образца. В эксперименте использовали фен-калорифер мощностью $P=1800$ Вт. Площадь исследуемого пакета составила:

$$A = 0,50 \times 0,50 = 0,25 \text{ м}^2.$$

Удельный тепловой поток, приходящийся на единицу площади покрытия, выражается как:

$$q_{\text{мощ}} = \frac{P}{A}. \quad (2)$$

Подставляя численные значения, получаем $q_{\text{эксп}} = 7200 \text{ Вт/м}^2$.

Фактическая доля тепловой энергии, достигающая поверхности пакета, существенно ниже из-за аэродинамических потерь, неполного контакта воздушного потока с плёночной поверхностью, утечек и перераспределения тепла в тракте подачи.

Для исключения этих влияний использовался экспериментально измеренный температурный перепад по конструкции:

$$\Delta T_{\text{пак}} = T_{\text{ср.пак}} - T_{\text{ср.возд.}} = 56,38 - 37,68 = 18,7^\circ \text{C},$$

Зная теплоёмкость и массовый расход воздуха, величина действительного теплового потока определяется как:

$$q_{\text{масс}} = \dot{m} c_p \Delta T_{\text{пак}}, \quad (3)$$

где $\dot{m}$ – массовый расход воздуха, $c_p = 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{с}\cdot\text{K)}$ – удельная теплоёмкость воздуха.

Массовый расход воздуха был рассчитан из паспортной скорости воздушного потока фена и площади выходного сопла:

$$\dot{m} = \rho v A \approx 0,0099 \text{ кг/с}, \quad (4)$$

Тогда:

$$q_{\text{масс}} = 0,0099 \times 1005 \times 18,7 = 185,7 \text{ Вт/м}^2.$$

Коэффициент теплопередачи определяется зависимостью:

$$U = \frac{q_{\text{масс}}}{\Delta T_{\text{пак}}} = \frac{q_{\text{масс}}}{T_{\text{ср.пак}} - T_{\text{наруж}}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ср.пак}} = 46,32^\circ \text{C}$ – средняя температура плёночного пакета, $T_{\text{наруж}} = -7^\circ \text{C}$ – температура окружающего воздуха.

Соответственно:

$$U = \frac{185,7}{46,32 - (-7)} = \frac{185,7}{53,32} = 3,48 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Полученное значение $U=3,48 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ показывает, что секционированная воздушнонаполненная плёнка действительно создаёт устойчивый тепловой барьер. Для лабораторного образца это заметный результат. По теплоизоляции конструкция уже приближается к 10-мм сотовому поликарбонату. И здесь главный эффект даёт не сама плёнка – обычный полиэтилен в один слой тепло держит слабо. Решающую роль сыграла геометрия системы, воздух оказался разделён на секции и начал работать как стабильная теплоизоляционная прослойка.

Эксперимент показал, когда воздушный слой разделён на отдельные камеры, тепло проходит через конструкцию медленнее. Воздух уже не циркулирует крупными потоками, как в обычной двойной плёнке, поэтому температурный перепад вдоль покрытия становится стабильнее. Есть и другой эффект. Секции уменьшают тепловые пульсации, которые обычно появляются из-за ветра: плёнка начинает «дышать», а воздух периодически прокачивается между слоями. В нашей конструкции этот процесс заметно слабее. Поэтому полученное значение U -value показывает не просто отдельный результат, а саму перспективу подхода. Секционирование воздушной прослойки действительно может повысить энергоэффективность плёночных покрытий.

Нужно учитывать, что эксперимент мы проводили в контролируемых условиях. Там не было полноценного ветрового давления, осадков, резких изменений влажности и суточных перепадов температуры. Поэтому полученное значение показывает прежде всего теплотехнический потенциал конструкции. Для окончательной оценки нужны полевые испытания. Полевые исследования помогут понять, насколько стабильно держатся секции при ветре, сохраняется ли тепловой барьер при длительной эксплуатации и какую реальную экономию энергии такая плёнка может дать в тепличных комплексах. Отдельно стоит подключить CFD-моделирование. Оно позволит увидеть, как внутри камер распределяются температура и скорость воздуха, как геометрия секций влияет на теплопотери и какую конфигурацию лучше выбрать, чтобы ещё снизить U -value. В целом эксперимент показывает, секционированная воздушнонаполненная плёнка имеет реальный потенциал как доступное и энергоэффективное покрытие для теплиц.

Выводы

Исследование показало, что секционированная воздушнонаполненная плёнка действительно работает как теплоизоляционное покрытие. Полученное значение $U=3,48 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ говорит о заметном снижении теплопотерь по сравнению с обычной полиэтиленовой плёнкой. По своим характеристикам опытный образец уже приближается к двухслойному сотовому поликарбонату. Главную роль здесь сыграли замкнутые воздушные камеры. Они не дают воздуху свободно перемещаться между слоями, поэтому внутри конструкции слабее развиваются конвективные потоки. Температура распределяется ровнее, а тепловой барьер получается более устойчивым. Температурные профили подтвердили этот эффект. Обычная двойная плёнка без стабилизации воздушного зазора так работать не может. Воздушный поток внутри неё легче смещается, а теплоизоляция становится нестабильной. В нашей конструкции секции уменьшают тепловые пульсации и помогают сохранить более ровный температурный режим даже тогда, когда входящий тепловой поток немного меняется.

Полученные результаты показывают, что такая плёнка имеет хороший практический потенциал. На её основе можно создавать лёгкие, недорогие и энергоэффективные покрытия для теплиц нового поколения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Maraveas, C.** Environmental Sustainability of Greenhouse Covering Materials // Sustainability. – 2019. – Vol.11, № 21. – 24 p.
2. **Lee, H. W., Sim, S. Y., Kim, Y. S.** Characteristics of PPF Transmittance and Heat Flow by Double Covering Methods of Plastic Film in Tomato Greenhouse // Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers. – 2010. – Vol.52. – P. 11–17.
3. **Kim, H. K., Kang, G. C., Moon, J. P., Lee, T. S., Oh, S. S.** Estimation of Thermal Performance and Heat Loss in Plastic Greenhouses with and without Thermal Curtains // Energies. – 2018. – P. 578–589.
4. **Xu, J., Bai, W., Wang, J., Mu Z., Sun, W., Dong, B., Song, K., Yang, Y., Guo, S., Shu, S.** Study on the Cooling Effect of Double-Layer Spray Greenhouse // Agriculture. – 2023. – P. 1442–1455.
5. **Jayasekara, Sh., Na, W., Owolabi, A., Jong, W., Rasheed, A., Hyeon, T., Hyun, W.** Comparison of Environmental Conditions and Insulation Effect between Air Inflated and Conventional Double Layer Greenhouse // Protected Horticulture and Plant Factory. – 2018. – Vol.27. – P. 46–53.
6. **Abbouda, S., Almuhanha, E., Al-Amri, A.** Effect of Using Double Layers of Polyethylene Cover with Air Gap on Control Environment inside Greenhouses

// International Journal of Latest Trends in Agriculture and Food Sciences. – 2012. – Vol.2. – P. 58–65.

7. **Ido, S., Dvora, K., Uri, M.P., Nahum, L.** Transfer coefficients of several polyethylene greenhouse covers // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1988. – Vol.39, Issue 1. P. 19–37.

8. **Adam, A., Kouider, S.A., Youssef, B., Hamou, A., Saiter, J.M.** Studies of polyethylene multi layer films used as greenhouse covers under Saharan climatic conditions // Polymer Testing. – 2005. – Vol.24, Issue 7. – P. 834–838.

9. **Lempidakis, I., Lempidakis, E., Lempidakis, M.** Multilayer plastic film with separable layers for covering of inflated greenhouse // Patent US 20130097922. – 25.04.2013.

10. **Lempidakis, I., Lempidakis, E., Lempidakis, M.** Multilayer plastic film with separable layers for covering of inflated greenhouse // Patent US 20150239218. – 27.08.2015.

11. **Lempidakis, I., Lempidakis, E., Lempidakis, M.** Película plástica multicapa con capas separables para cubrir un invernadero inflado // Patent ES 2825749. – 23.09.2020.

Поступило в редакцию 28.11.25.

Поступило с исправлениями 11.02.26.

Принято в печать 03.06.26.

**А. С. Төлебиев¹, М. С. Исатаев²,*

Б. Ж. Бектібай³, М. С. Артыков⁴

^{1,2,3,4}Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

28.11.25 ж. баспаға түсті.

11.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

03.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЭНЕРГИЯ ТИІМДІ ШЕШІМДЕРГЕ АРНАЛҒАН СЕКЦИЯЛАНҒАН АУАҒА ТОЛТЫРЫЛҒАН ПЛЁНКАНЫҢ ЖЫЛУ ОҚШАУЛАУ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Жылыжайлардың энергия тиімділігі қоршау конструкцияларының жылу оқшаулау қасиеттерімен анықталады, олардың ішінде полиэтиленді жабындар қолжетімділігі мен технологиялық сипатына байланысты ең көп тараған болып қала береді. Алайда, дәстүрлі қос қабатты жабынды жүйелер ауа қабатының

тұрақсыздығымен және конвективті жылу шығындарының жоғары деңгейімен шектеледі. Бұл жұмыста ауа аралық қабаты ауа айналымына кедергі келтіретін және тұрақты жылу кедергісін қалыптастыратын тәуелсіз камераларға бөлінген жаңа секцияланған ауа толтырылған конструкцияның жылу оқшаулау сипаттамалары зерттеледі. Эксперименттік қондырғыға камералардың берілген геометриясы бар екі қабатты полиэтиленді жүйе, жылу үрлегіші және пирометриялық бақылау жүйесі кірді. Температуралық профильдерді өлшеу және жабын қоршау арқылы өтетін жылу ағынын есептеу жүргізілді. Алынған жылу беру коэффициентінің мәні $U=3,48 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ құрады, бұл стандартты бір қабатты полиэтиленге қарағанда айтарлықтай төмен және 8–10 миллиметрлік көп камералы поликарбонаттың сипаттамаларымен салыстыруға болады. Нәтижелер ауа қабатын секциялау макроконвекцияны тиімді басатынын және конструкцияның салмағы мен құнын айтарлықтай арттырмай термикалық кедергінің жоғарылауын қамтамасыз ететінін растайды. Зертханалық жағдайлар желдің, күн радиациясының және жауын-шашынның әсерін ескермейтіні атап өтілді, сондықтан түпкілікті бағалау үшін далалық сынақтар қажет. Қосымша түрде, әртүрлі климаттық сценарийлердегі ауа камераларының мінез-құлқын болжау және секциялардың геометриясын оңтайландыру үшін CFD-модельдеуді қолдану ұсынылды. Жүргізілген зерттеу секцияланған ауа толтырылған жабынның жаңа буынды жылыжай жабындары үшін қолжетімді және энергия тиімді шешім ретіндегі жоғары әлеуетін көрсетеді.

Кілтті сөздер: секцияланған жабын, ауаға толтырылған қабат, жылу өткізгіштік, жылуөткізу коэффициенті, полиэтилен жабындысы, энергия тиімді қоршағыш.

*A. S. Tolebiev¹, M. S. Isatayev²,
B. Zh. Bektibay³, M. S. Artykov⁴

^{1,2,3,4}Al-Farabi Kazakh National University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 28.11.25.

Received in revised form 11.02.26.

Accepted for publication 03.06.26.

INVESTIGATION OF THERMAL INSULATION PROPERTIES OF SECTIONED AIR-FILLED FILM FOR ENERGY-EFFICIENT SOLUTIONS

The energy efficiency of greenhouse structures is largely determined by the thermal insulation properties of their enclosing elements, among which polyethylene films remain the most widely used due to their availability and technological simplicity. However, traditional double-layer film systems are limited by the instability of the air gap and high convective losses. This study investigates the thermal insulation performance of a new segmented air-filled film construction in which the air layer is divided into independent chambers that suppress internal air circulation and create a stable thermal barrier. The experimental setup consisted of a two-layer polyethylene system with a predefined chamber geometry, a thermal air blower, and an infrared pyrometric measurement system. Temperature profiles were recorded, and the heat flux through the film enclosure was evaluated. The resulting heat transfer coefficient was $U=3.48 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, which is significantly lower than that of standard single-layer polyethylene and comparable to the thermal characteristics of 8–10 mm multi-wall polycarbonate sheets. The findings confirm that segmenting the air layer effectively suppresses macro-convection and enhances thermal resistance without substantially increasing the mass or cost of the construction. It is noted that laboratory conditions do not account for wind loads, solar radiation, precipitation, or humidity fluctuations; therefore, field tests are required to validate the real-world performance of the system. The use of CFD modeling is additionally proposed to predict airflow behavior within the chambers under various climatic scenarios and to optimize the geometry of the segmented structure. Overall, the study demonstrates a high potential of the segmented air-filled film system as an accessible and energy-efficient solution for next-generation greenhouse coverings.

Keywords: segmented film, air-filled layer, heat transfer, heat transfer coefficient, polyethylene covering, energy-efficient enclosing structures.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz