

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 69.036 + 699.865

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-72-88

*С.Н. ОВСЯННИКОВ, В.Н. ОКОЛИЧНЫЙ, А.Н. ОВСЯННИКОВ,  
О.В. ЛЕЛЮГА, А.С. САМОХВАЛОВ,*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## **МНОГОСЛОЙНОЕ ПЛЕНОЧНОЕ ПОКРЫТИЕ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ\***

**Аннотация.** В статье выполнен обзор большепролетных конструкций и сооружений с покрытиями из пленки этилен-тетрафторэтилена. Рассматриваются характеристики этилен-тетрафторэтилена и возможности его применения. Представлены результаты натурных теплотехнических испытаний отдельных ячеек покрытия в виде пленкопакетов и сегмента ограждающей конструкции с натурными размерами и с различным числом слоев в пленкопакетах, а также результаты светотехнических испытаний многослойных пленочных покрытий. Результаты исследования многослойных покрытий из пленки этилен-тетрафторэтилена показали возможность достижения высоких теплозащитных и светотехнических характеристик ограждающих конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях сурового климата.

**Ключевые слова:** этилен-тетрафторэтилен, многослойные пленочные покрытия, энергосбережение, тепловая защита, светотехнические характеристики

**Для цитирования:** Овсянников С.Н., Околичный В.Н., Овсянников А.Н., Лелюга О.В., Самохвалов А.С. Многослойное пленочное покрытие с высоким уровнем тепловой защиты // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 72–88.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-72-88

---

\* Исследование выполнено по заказу ФГУП «ГНПП «КРОНА» по теме «Поиск, исследование и анализ решений несущих, ограждающих конструкций и оснований для создания большепролетных климатических искусственных укрытий для условий районов Крайнего Севера и вечной мерзлоты» и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту FEMN-2020-0003.

S.N. OVSYANNIKOV, V.N. OKOLICHNYI, A.N. OVSYANNIKOV,  
O.V. LELYUGA, A.S. SAMOKHVALOV,  
Tomsk State University of Architecture and Building

## MULTILAYERED COATINGS WITH HIGH THERMAL PROTECTION

**Abstract.** The paper reviews the long span structure with the ethylene-tetrafluoroethylene (ETFE) coating. The ETFE coating properties and possibilities of its application are considered herein. The paper presents results of natural heat engineering tests of separate cells of the coating in the form of a foil package and enclosing structure segment of natural size with various number of ETFE layers and lighting tests of multilayered coatings. It is shown that high thermal protection and illuminating parameters can be gained for ETFE-coated enclosing structures for the operation in arctic conditions.

**Keywords:** ethylene-tetrafluoroethylene, multilayered coating, energy saving, thermal protection, light transmission

**For citation:** Ovsyannikov S.N., Okolichnyi V.N., Ovsyannikov A.N., Lelyuga O.V., Samokhvalov A.S. Mnogosloinoe plenochnoe pokrytie s vysokim urovnem teplovoi zashchity [Multilayered coatings with high thermal protection]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24, No. 4. Pp. 72–88.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-72-88

Значительную часть России занимают северные и удаленные территории, для которых существует необходимость создания сверхлегких большепролетных конструктивных систем со светопрозрачными ограждающими конструкциями, обладающими высокой теплозащитой. В связи с активным освоением Арктики [1] формирование комфортной среды жизнедеятельности на этой территории приобретает особую актуальность для России.

Сухопутная часть Арктики Российской Федерации с экстремальными климатическими условиями занимает территорию около 2,2 млн кв. км. Климат здесь крайне суров, имеет расчетные температуры наружного воздуха до  $-58\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в Якутии – до  $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а продолжительность отопительного периода длится до 340 сут. Активное освоение Арктической зоны обусловлено огромными запасами углеводородов, цветных и благородных металлов, других полезных ископаемых. На арктическом побережье России расположены порты, обслуживающие Северный морской путь, который почти вдвое короче, чем другие морские пути из Европы на Дальний Восток и в Юго-Восточную Азию.

В Арктической зоне востребованы большепролетные, в том числе купольные сооружения с покрытием, обладающим достаточно высоким коэффициентом светопропускания и значительным сопротивлением теплопередаче. В закрытом оболочкой пространстве могут быть размещены вахтовые поселки с жилыми и общественными зданиями, сформированы производственные площадки с ангарами для обслуживания и хранения техники, складскими помещениями и др. Отдельные сооружения с более высокими температурами могут быть использованы для сельскохозяйственного назначения. Для формирования территории, защищенной от суровой внешней среды, наилучшим образом под-

ходят легкие большепролетные конструкции с покрытием из пленки этилен-тетрафторэтилена (ЭТФЭ) [2].

Отечественный и зарубежный опыт современного строительства большепролетных сооружений со светопрозрачными покрытиями показывает, что большинство современных покрытий выполнено из пневматических подушек в один или несколько слоев пленки ЭТФЭ. Десятки объектов построены за рубежом (рис. 1), ряд объектов построены и успешно эксплуатируются в России: в Сочи, Санкт-Петербурге, Екатеринбурге, Тюмени (рис. 2).



а



б



в



г



д



е

Рис. 1. Покрытия сооружений из пленки ETFE (ЭТФЭ): а – ботанический сад «Эдем», Великобритания; б – национальный плавательный комплекс, Китай; в – Флора Экспо, Китай; г – зоопарк Leipzig Zoo, Германия; д – здание «Хан-Шатыр», Казахстан; е – арочный каркас для натяжения пленок

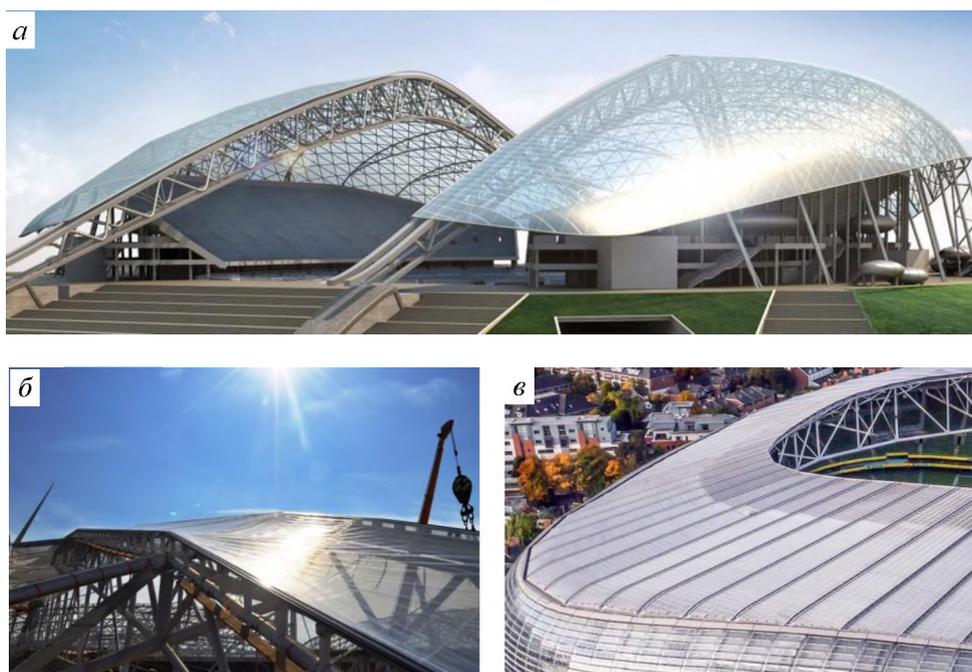


Рис. 2. Покрытия сооружений из пленки ЭТФЭ в России:

*а* – олимпийский стадион «Фишт», Сочи; *б* – стадион «Газпром Арена», Санкт-Петербург; *в* – светопрозрачное покрытие стадиона «Казань-Арена», Екатеринбург

Пленка ЭТФЭ обладает уникальными прочностными и физико-техническими свойствами, имеет высокие характеристики светопропускания, устойчива к солнечной радиации. Исследованиям свойств пленки ЭТФЭ и ее применению посвящен целый ряд отечественных и зарубежных работ [3–24]. Вместе с тем практика показала, что пленка ЭТФЭ использовалась только в пневматических конструкциях, требующих постоянной подкачки воздуха, а сами подушки изготавливались и исследовались с числом воздушных промежутков не более трех. Приведенное сопротивление теплопередаче ( $R_0$ ) таких подушек по глади, т. е. без учета теплопроводных включений каркаса ограждения, имеет невысокие значения. Согласно своду правил (СП)<sup>1</sup>, прил. Н, для подушки с 2 рядами пленки  $R_0 = 0,508 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , для подушки с 3 рядами пленки  $R_0 = 0,587 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , для подушки с 4 рядами пленки  $R_0 = 0,666 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ . Для пневматических пленочных конструкций достижение указанных значений маловероятно, поскольку все воздушные промежутки (камеры) не замкнуты, а связаны между собой для обеспечения равномерной подачи воздуха от компрессора. Кроме этого, узлы крепления подушек непосредственно на металлический каркас создают высокие локальные трансмиссионные теплотери.

Вместе с тем для многослойных пленочных конструкций с замкнутыми воздушными промежутками достижимым значением является сопротивление

<sup>1</sup> СП 363.1325800.2017. Покрытия светопрозрачные и фонари зданий и сооружений. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ, 2017. 31 с.

теплопередаче не менее  $1,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , поэтому было принято решение разработать и испытать конструкцию сегмента оболочки с ячейками из многокамерных пленкопакетов с высокими значениями сопротивления теплопередаче.

Для этой цели в Томском государственном архитектурно-строительном университете (ТГАСУ) по заказу ФГУП «ГНПП «Крона» разработаны конструкции сегмента покрытия с ячейками из многокамерных пленкопакетов с использованием пленки ЭТФЭ. Проведены лабораторные теплотехнические и светотехнические испытания пленки ЭТФЭ, многокамерных пленкопакетов и треугольного сегмента в натурную величину в климатических камерах ТГАСУ.

Программа теплотехнических испытаний включала в себя измерения тепловых потоков и температур, а затем и определение приведенного сопротивления теплопередаче пленкопакетов, выполненных из пленки ЭТФЭ толщиной 100 мкм, с количеством воздушных промежутков в 11 мм от 1 до 12. Некоторые пленкопакеты изготавливались с дополнительными слоями пленки из лавсана и нанесенным на него теплоотражающим покрытием (ТОП). В световых камерах лаборатории строительной физики ТГАСУ конструкции пленкопакетов исследовались для определения коэффициента светопропускания.

#### Теплотехнические испытания ячеек покрытия – пленкопакетов

Треугольные ячейки – пленкопакеты с конструктивными размерами 1260 мм являются составной частью сегмента (фрагмента) ограждающего купольного покрытия, который выполнен треугольной формы со стороной 3,0 м и в котором установлены четыре ячейки из пленкопакетов. Для изготовления пленкопакетов с пленками ЭТФЭ 100 мкм в эксперименте использовались деревянные клееные рейки сечением  $19 \times 11$  мм с нервюрами посередине сечением  $1 \times 1$  мм (рис. 3) и для пленкопакетов с пленкой 250 мкм – стеклопластиковые коробчатые профили 25 мм.

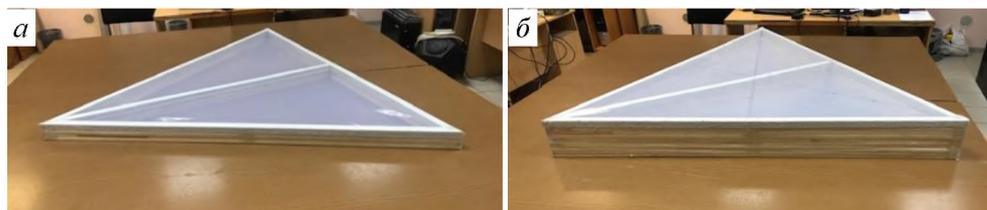


Рис. 3. Ячейки пленкопакетов: а – 4-камерный; б – 10-камерный

Теплотехнические испытания отдельных пленкопакетов и их набора в комбинации с ЭТФЭ и лавсановой пленкой с ТОП производились в холодильной камере лаборатории строительной физики по ГОСТ 25380–2014<sup>2</sup> и ГОСТ 26254–84<sup>3</sup> (рис. 4).

<sup>2</sup> ГОСТ 25380–2014. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. Москва: Стандартинформ. 2018. 16 с.

<sup>3</sup> ГОСТ 26254–84. Здания и сооружения Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. М.: Стандартинформ. 1985. 27 с.

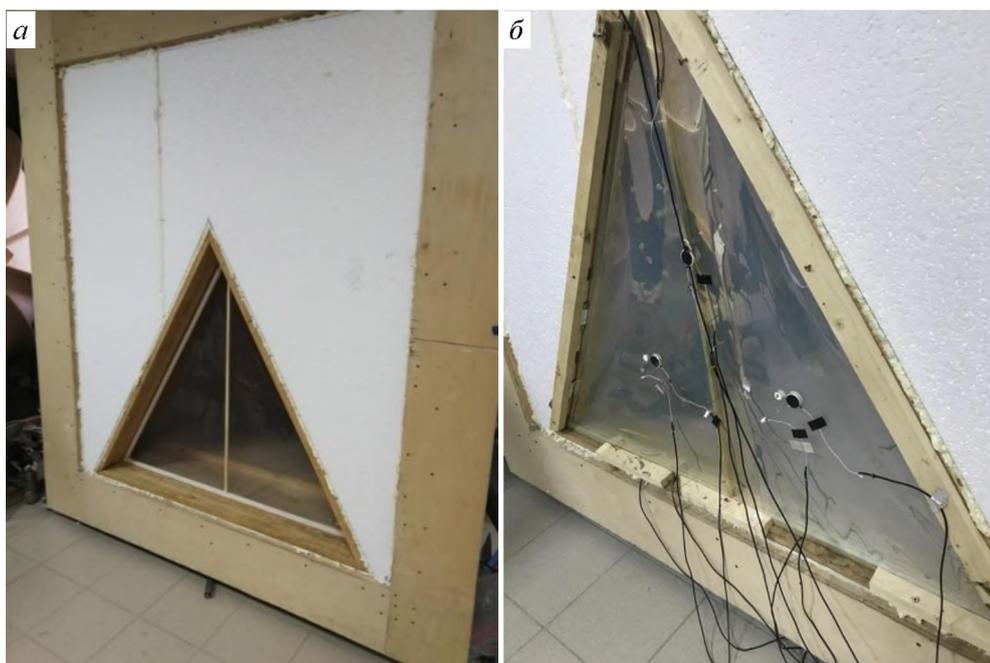


Рис. 4. Теплотехнические испытания отдельных ячеек-пленкопакетов в холодильной камере:  
 а – ячейка с пленкой ЭТФЭ; б – ячейка-пленкопакет с пленкой ЭТФЭ и лавсановая пленка с ТОП

Испытания позволили определить приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ячеек сегмента с различным количеством слоев пленок и воздушных промежутков, а также оценить влияние теплоотражающих покрытий. Результаты испытаний показали, что однокамерный пленкопакет с воздушным промежутком 11 мм дает приведенное сопротивление теплопередаче  $0,38 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$  с учетом термического сопротивления слоя, сопротивления теплоотдачи и тепловосприятия соответственно наружной и внутренней поверхностей. Каждый дополнительный воздушный промежуток добавляет дополнительное термическое сопротивление пленкопакета в среднем  $0,15 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ . Десятикамерный пленкопакет (11 пленок ЭТФЭ) дает сопротивление теплопередаче  $1,70 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ . Исследование теплозащиты пленкопакетов с ТОП производилось с использованием лавсановой пленки с нанесенным теплоотражающим покрытием. Двухкамерный пленкопакет (2 пленки ЭТФЭ и пленка с ТОП) показал высокое сопротивление теплопередаче  $1,07 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , что вдвое выше, чем пленкопакет без ТОП. Трехкамерный пленкопакет (2 пленки ЭТФЭ и 2 пленки с ТОП) показал сопротивление теплопередаче  $1,35 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , что вдвое выше, чем трехкамерный пленкопакет без ТОП ( $0,69 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ). Одиннадцатикамерный пленкопакет (11 пленок ЭТФЭ и 1 пленка с ТОП) показал сопротивление теплопередаче  $1,96 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , а двенадцатикамерный пленкопакет (11 пленок ЭТФЭ и 2 пленки с ТОП) показал еще более высокое сопротивление теплопередаче  $2,38 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ . Последний результат сопоставим с сопротивлением теплопередаче

стенowych панелей современных крупнопанельных зданий, состоящих из 2 слоев керамзитобетона общей толщиной 200 мм и слоя пенополистирола 200 мм, для которых величина приведенного сопротивления теплопередаче с учетом влияния гибких и жестких связей составляет около  $2,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ .

Результаты измерения приведенного сопротивления теплопередаче пленкопакетов представлены в табл. 1 и на рис. 5, 6.

Таблица 1

**Результаты измерения приведенного сопротивления  
теплопередаче пленкопакетов**

№ п/п	Наименование пленкопакета	Приведенное сопротивление теплопередаче, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$
1	1-камерный пленкопакет (2 пленки ЭТФЭ)	0,38
2	2-камерный пленкопакет (3 пленки ЭТФЭ)	0,53
3	3-камерный пленкопакет (4 пленки ЭТФЭ)	0,69
4	4-камерный пленкопакет (5 пленок ЭТФЭ)	0,84
5	5-камерный пленкопакет (6 пленок ЭТФЭ)	0,95
6	6-камерный пленкопакет (7 пленок ЭТФЭ)	1,11
7	7-камерный пленкопакет (8 пленок ЭТФЭ)	1,25
8	8-камерный пленкопакет (9 пленок ЭТФЭ)	1,40
9	9-камерный пленкопакет (10 пленок ЭТФЭ)	1,55
10	10-камерный пленкопакет (11 пленок ЭТФЭ)	1,70
11	2-камерный пленкопакет (2 пленки ЭТФЭ и пленка с ТОП)	1,07
12	3-камерный пленкопакет (2 пленки ЭТФЭ и 2 пленки с ТОП)	1,35
13	11-камерный пленкопакет (11 пленок ЭТФЭ и 1 пленка с ТОП)	1,96
14	12-камерный пленкопакет (11 пленок ЭТФЭ и 2 пленки с ТОП)	2,38

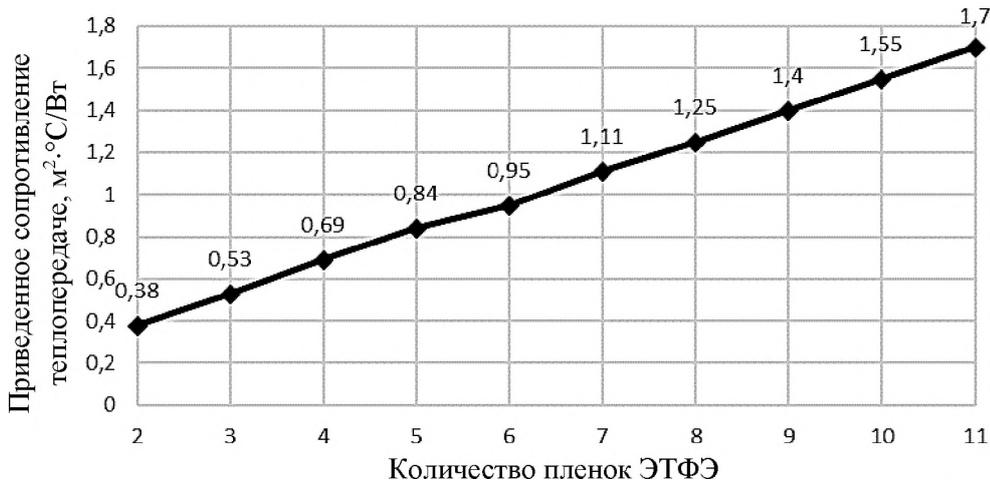


Рис. 5. График зависимости сопротивления теплопередаче от числа пленок ЭТФЭ в пленкопакете

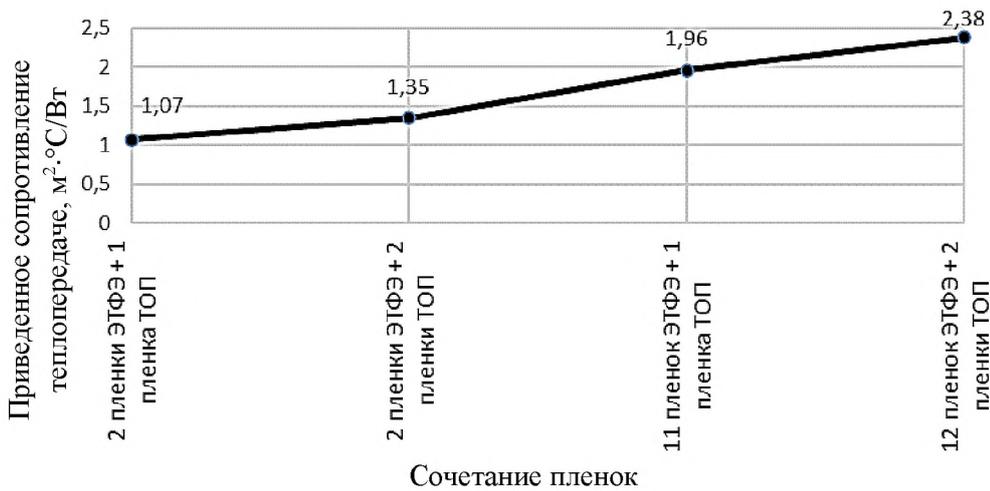


Рис. 6. График зависимости сопротивления теплопередаче от числа пленок ЭТФЭ и ТОП в пленкопакете

Результаты исследования теплозащитных свойств многокамерных пленкопакетов из ЭТФЭ показали техническую возможность получения сверхлегких светопрозрачных ограждающих конструкций. Как можем видеть из табл. 1, многослойные пленочные кассеты с ТОП имеют перспективу заменить традиционные теплоизолирующие материалы и в непрозрачных ограждающих конструкциях, что позволит получить сверхлегкие ограждения, пригодные для транспортировки, монтажа и эксплуатации на удаленных арктических территориях.

### Светотехнические испытания пленки ЭТФЭ и многокамерных пленкопакетов

Светотехнические испытания пленкопакетов выполнены в светомерных камерах ТГАСУ (рис. 7) по ГОСТ 26602.4–2012<sup>4</sup> для ряда пленкопакетов, различных по числу и наличию теплоотражающих покрытий (рис. 8).



Рис. 7. Общий вид светомерных камер

В результате экспериментов выявлено, что коэффициент светопропускания одной пленки ЭТФЭ 100 мкм вместе с дистанционной рамкой составил в среднем  $\tau_0 = 0,873$ ; одной пленки ЭТФЭ 250 мкм с дистанционной рамкой  $\tau_0 = 0,871$ . С учетом того что коэффициент светопропускания пустой рамки  $\tau_2 = 0,933$ , коэффициент светопропускания по материалу ЭТФЭ составил для пленки 100 мкм  $\tau_1 = 0,94$  и для пленки 250 мкм  $\tau_1 = 0,93$ . Эти результаты достаточно близко соответствуют характеристикам, заявленным производителем.

<sup>4</sup> ГОСТ 26602.4–2012. Блоки оконные и дверные. Метод определения общего коэффициента пропускания света. Москва: Стандартинформ. 2014. 15 с.

лем ( $\tau_1 = 0,96$ ) без указания толщины материала, что, безусловно, влияет на результат. Результаты измерения светотехнических характеристик пленкопакетов с различным количеством пленок и ТОП представлены в табл. 2 и на рис. 9.



Рис. 8. Монтаж пленкопакетов в светомерных камерах

Таблица 2

**Результаты светотехнических испытаний  
многослойных пленочных пакетов**

№ п/п	Наименование конструкции образца	Общий коэффициент светопропускания по пленке $\tau_0$	Коэффициент светопропускания по переплетам $\tau_2$
1	Деревянная треугольная рамка без пленки	–	0,933
2	Одна рамка с 1 пленкой лавсановой в 1 слой с теплоотражающим покрытием	0,397	–
3	Одна рамка с 1 пленкой ЭТФЭ 100 мкм в 1 слой	0,866	–
4	Одна рамка с 1 пленкой ЭТФЭ 100 мкм в 1 слой	0,868	–
5	Одна рамка с 1 пленкой ЭТФЭ 100 мкм в 1 слой	0,884	–
6	Две рамки с 2 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,821	–
7	Три рамки с 3 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,734	–

Окончание табл. 2

№ п/п	Наименование конструкции образца	Общий коэффициент светопропускания по пленке $\tau_0$	Коэффициент светопропускания по переплетам $\tau_2$
8	Четыре рамки с 4 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,667	–
9	Пять рамок с 5 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,640	–
10	Шесть рамок с 6 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,582	–
11	Семь рамок с 7 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,531	–
12	Восемь рамок с 8 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,509	–
13	Девять рамок с 9 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,459	–
14	Десять рамок с 10 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,427	–
15	Одиннадцать рамок с 11 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,400	–
16	Двенадцать рамок с 12 пленками ЭТФЭ 100 мкм	0,354	–
17	Одна рамка с 1 пленкой ЭТФЭ 250 мкм	0,871	–
18	Две рамки с 2 пленками ЭТФЭ 250 мкм	0,750	–

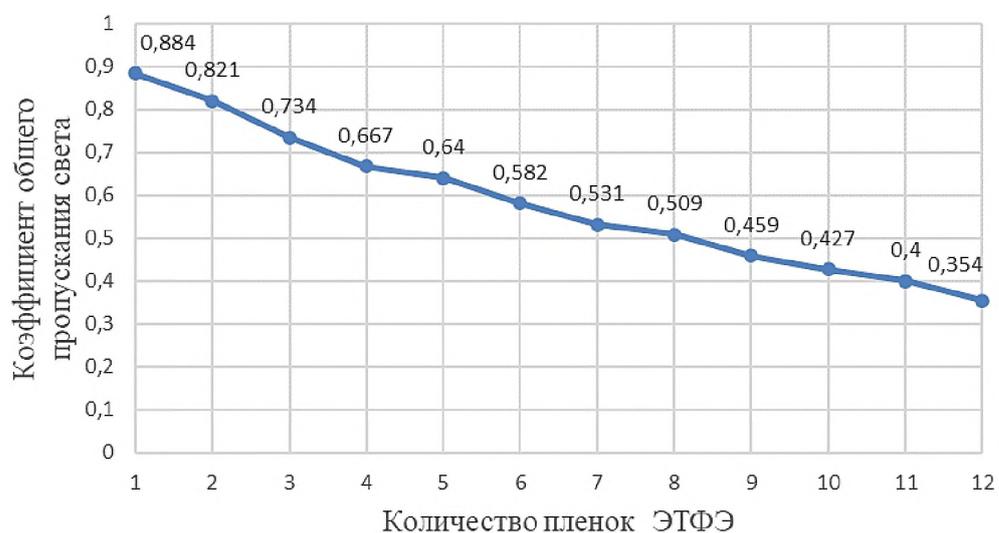


Рис. 9. График зависимости общего коэффициента светопропускания пленкопакетов от количества пленок толщиной 100 мкм

Из графика на рис. 9 и табл. 2 можем видеть, что каждый дополнительный слой ЭТФЭ толщиной 100 мкм вместе с рамкой снижает коэффициент светопропускания в среднем на 0,044. Следует также отметить, что 11-камерный пленкопакет с 12 пленками ЭТФЭ дает общий коэффициент светопропускания 0,354.

Вместе с тем измерения коэффициента светопропускания одной лавсановой пленки с теплоотражающим покрытием на рамке показали весьма низкий коэффициент общего светопропускания  $\tau_0 = 0,397$ . Данный результат указывает на необходимость разработки технологии нанесения теплоотражающих покрытий на пленки ЭТФЭ магнетронным способом, поиска оптимальных решений пленкопакетов и изучения светотехнических характеристик пленок ЭТФЭ и пленкопакетов с ТОП. Светотехнические исследования показали целесообразность дополнительных светотехнических испытаний готовых опытных образцов многослойных пленочных кассет и внесения этих сведений как справочных в нормативную литературу для проектирования светопрозрачных конструкций с многокамерными пленкопакетами из ЭТФЭ.

#### **Исследование сопротивления теплопередаче треугольного сегмента прототипа светопрозрачной ограждающей конструкции**

Теплотехнические исследования и определение приведенного сопротивления теплопередаче треугольного сегмента оболочки проведены по методике ГОСТ 25380–2014<sup>5</sup> и ГОСТ 26254–84<sup>6</sup> в климатических камерах ТГАСУ, имеющих холодную камеру с объемом 33,53 м<sup>3</sup> и теплую камеру с объемом 30,04 м<sup>3</sup>, между которыми устроен проем 2,8×2,5 м. Холодильный агрегат мощностью 3,5 кВт способен в автоматическом режиме поддерживать температуры до –45 °С. В холодной камере для эксперимента построен деревянный каркас для монтажа прототипа сегмента и смонтирована теплоизоляция конструкции из пенополистирола толщиной 200 мм (рис. 10).

Сегмент выполнен из 3 несущих стеклопластиковых профилей 100×100 мм, формирующих треугольный сегмент с внешними размерами 3,0 м. В него встроены тавровые профили с высотой стенки 190 мм и шириной полки 100 мм, образующие четыре ячейки для монтажа пленкопакетов.

В ячейки вставлены разные по числу слоев пленкопакеты:

- 10-камерный пленкопакет с двумя пленками ЭТФЭ 250 мкм и 9 пленками ЭТФЭ 100 мкм;
- 10-камерный пленкопакет с двумя пленками ЭТФЭ 250 мкм, 8 пленками ЭТФЭ 100 мкм и 1 лавсановой пленкой с ТОП;
- 7-камерный пленкопакет с двумя пленками ЭТФЭ 250 мкм, 5 пленками ЭТФЭ 100 мкм и 1 лавсановой пленкой с ТОП;
- 4-камерный пленкопакет с двумя пленками ЭТФЭ 250 мкм и 3 пленками ЭТФЭ 100 мкм.

<sup>5</sup> ГОСТ 25380–2014. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. Москва: Стандартинформ. 2018. 16 с.

<sup>6</sup> ГОСТ 26254–84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Москва: Стандартинформ. 1985. 27 с.



Рис. 10. Сегмент оболочки со стороны холодной камеры

Набор различных пленкопакетов позволил получить экспериментальные данные для различных конструктивных решений оболочки. Плотности тепловых потоков и температуры на пленкопакетах и каркасе сегмента измерялись многоканальным измерительным прибором ИТП-МГ 4.03-100 «Поток» (рис. 11).

Измерения сопротивления теплопередаче показали высокие значения по пленкопакетам, но очень низкие значения сопротивления теплопередаче по стеклопластиковым профилям в виде полый квадратной трубы  $100 \times 100$  мм, усиленной тавром  $190 \times 100$  мм. После заполнения стеклопластиковых профилей пенополиуретаном приведенное сопротивление теплопередаче сегмента оболочки существенно возросло (табл. 3).



Рис. 11. Сегмент оболочки со стороны теплой камеры с датчиками теплового потока

Таблица 3

**Приведенное сопротивление теплопередаче сегмента купола с различными ячейками**

№ п/п	Конструкция ячейки сегмента	Приведенное сопротивление теплопередаче, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$
1	10-камерный пленкопакет без ТОП	1,359
2	10-камерный пленкопакет с ТОП на внутренней пленке	1,612
3	7-камерный пленкопакет с ТОП на внутренней пленке	1,300
4	4-камерный пленкопакет без ТОП	0,860

Теплотехнические испытания натурального фрагмента покрытия указали на необходимость совершенствования конструкции переплетов, которые были приняты для эксперимента из имевшихся на рынке профилей. Численные расчеты авторов с использованием программы «Террег-3D» показывают, что в этом случае теплозащита по профилям может быть не ниже, чем по пленкопакетам.

## Выводы

Результаты исследования многослойных пленочных покрытий из пленки ЭТФЭ продемонстрировали возможность достижения высоких теплозащитных и светотехнических показателей ограждающих конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях сурового климата. Локализация производства пленки ЭТФЭ в России и существенное снижение ее стоимости позволят в перспективе проектировать арктические вахтовые поселки, различного типа укрытия, оранжереи, тепличные комплексы и сооружения гражданского назначения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года*. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 26 октября 2020 г. № 645.
2. *Овсянников С.Н.* Концепция создания комфортной среды жизнедеятельности в экстремальном климате Арктики // ИГН как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : сб. материалов XII Международной научно-практической конференции. Томск, 2022. Ч. 1. С. 17–29.
3. *Новое в технологии соединений фтора* : пер. с японск. / под ред. Н. Исикавы. Москва : Мир, 1984. 592 с.
4. *Пашиин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С.* Фторопласты. Ленинград : Химия, 1978. 232 с.
5. *Houtman R., Llorens J.I.* Materials used for architectural fabric structures // *Fabric Structures in Architecture*. Woodhead Publishing, Boston, MA, 2015. P. 101–120.
6. *Robinson-Gayle S., Kolokotroni M., Cripps A., Tanno S.* ETFE foil cushions in roofs and atria // *Constr. Build. Mater.* 2001. 15 (7). P. 323–327.
7. *Chilton J.* Lightweight envelopes: ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture // *Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater.* 2013. 166 (6). P. 343–357.
8. *Chilton J., Lau B.* Lighting and the visual environment in architectural fabric structures // *Fabric Structures in Architecture*. 2015. P. 203–219.
9. *Robinson L.A.* Structural Opportunities of ETFE (Ethylene Tetra Fluoro Ethylene). Massachusetts Institute of Technology, 2005. P. 66.
10. *Hu J., et al.* Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior // *Construction and Building Materials*. 2017. 131. P. 411–422.
11. *Chen W.* Design of Membrane Structure Engineering // China Building Industry Press. 2010.
12. *Charbonneau L., Polak M.A., Penlidis A.* Mechanical properties of ETFE foils: testing and modelling // *Constr. Build. Mater.* 2014. 60. P. 63–72.
13. *Li Y., Wu M.* Uniaxial creep property and viscoelastic-plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil // *Mech. Time-Depend.* 2015. Mater. 19 (1). P. 21–34.
14. *Chen W., Tang Y., Ren X., Dong S.* Analysis methods of structural design and characteristics of numerical algorithm for ETFE air inflated film structures // *Spat. Struct.* 2010. 16 (4). P.38–43.
15. *Hu J., Chen W., Sun R., Zhao B., Luo R.* Mechanical properties of ETFE foils under uniaxial cyclic tensile loading // *J. Build. Mater.* 2015. 18 (1). P. 69–75.
16. *Hu J., Chen W., Luo R., Zhao B., Sun R.* Uniaxial cyclic tensile mechanical properties of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils // *Constr. Build. Mater.* 2014. 63 (1). P. 311–319.
17. *Schmid G.* ETFE cushions and their thermal and climatic behavior // *Tensinet Symposium*, Milan, Italy. 2007. P. 115–125.
18. *Hu J., Chen W., Zhao B., Song H.* Experimental studies on summer performance and feasibility of a BIPV/T ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) cushion structure system // *Energy Build.* 2014. 69 (1). P. 394–406.
19. *Hu J., Chen W., Zhao B., Song H.* Experimental studies on system performance of PV-ETFE cushion system in winter // *J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)*. 2014. 48 (10). P. 1816–1821.

20. Zanelli A., Beccarelli P., Monticelli C., Maffei R., Ibrahim H.M. Technical and manufacturing aspects in order to create a smart façade system with OPV integrated into ETFE foils // International Symposia IASS-APCS. Seoul. Korea, 2012.
21. Цейтмайер С. Пленочные фторполимеры / пер. А.П. Сергеевкова // Полимерные материалы. 2018. № 8. С. 30–38.
22. Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K. Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer I. Crystal structure // Polymer. 1986. 27 (7). P. 999–1006.
23. Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K. Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer. Transition from crystal phase to mesophase // Polymer. 1986. 27 (10). P. 1521–1528.
24. Kawabata M. Viscoplastic Properties of ETFE Film and Structural Behavior of Film Cushion // International Association for Shell and Spatial Structures Symposium, Venice, Italy, 2007.

#### REFERENCES

1. Strategiya razvitiya Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii i obespecheniya natsional'noi bezopasnosti na period do 2035 goda. Utverzhdena Ukazom Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 26 oktyabrya 2020 g. N 645 [Development strategy of the Arctic Zone of the Russian Federation and national security for the period up to 2035. Approved by President's Decree N 645 of the Russian Federation, October 26, 2020]. (rus)
2. Ovsyannikov S.N. Kontsepsiya sozdaniya komfortnoi sredy zhiznedeyatel'nosti v ekstremal'nom klimate Arktiki [The concept of creating a comfortable living environment in arctic conditions]. In: IGN kak draivery sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya territorii i povysheniya kachestva zhizni naseleniya: sb. materialov XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Proc. 12th Int. Sci. Conf. 'IGN as Drivers of Socio-Economic Development of Territory and Life Quality Improvement'). Tomsk, 2022. Pt 1. Pp. 17–29. (rus)
3. Isikava N., (Ed.) Novoe v tekhnologii soedinenii ftora [New in fluorine compound technology]. Moscow: Mir, 1984. 592 p. (rus)
4. Pashnin Yu.A., Malkevich S.G., Dunaevskaya Ts.S. Ftoroplasty [Fluorine plastics]. Leningrad: Khimiya, 1978. 232 p. (rus)
5. Houtman R., Llorens J.I. Materials used for architectural fabric structures. In: Fabric Structures in Architecture. Woodhead Publishing, Boston, MA, 2015. Pp. 101–120.
6. Robinson-Gayle S., Kolokotroni M., Cripps A., Tanno S. ETFE foil cushions in roofs and atria. *Construction and Building Materials*. 2001. V. 15. No. 7. Pp. 323–327.
7. Chilton J. Lightweight envelopes: Ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Urban Design and Planning*. 2013. V. 166. No. 6. Pp. 343–357.
8. Chilton J., Lau B. Lighting and the visual environment in architectural fabric structures. *Fabric Structures in Architecture*. 2015. Pp. 203–219.
9. Robinson L.A. Structural opportunities of ETFE (ethylene tetra fluoroethylene). *Massachusetts Institute of Technology*. 2005. P. 66.
10. Hu J., et al. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior. *Construction and Building Materials*. 2017. V. 131. Pp. 411–422.
11. Chen W. Design of Membrane Structure Engineering. China Building Industry Press. 2010.
12. Charbonneau L., Polak M.A., Penlidis A. Mechanical properties of ETFE foils: Testing and modelling. *Construction and Building Materials*. 2014. 60. P. 63–72.
13. Li Y., Wu M. Uniaxial creep property and viscoelastic-plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2015. V. 19 No. 1. Pp. 21–34.
14. Chen W., Tang Y., Ren X., Dong S. Analysis methods of structural design and characteristics of numerical algorithm for ETFE air inflated film structures. *Spatial Structure*. 2010. V. 16. No. 4. Pp. 38–43.
15. Hu J., Chen W., Sun R., Zhao B., Luo R. Mechanical properties of ETFE foils under uniaxial cyclic tensile loading. *Building Materials*. 2015. V. 18 No. 1. Pp. 69–75.

16. *Hu J., Chen W., Luo R., Zhao B., Sun R.* Uniaxial cyclic tensile mechanical properties of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils. *Construction and Building Materials*. 2014. V. 63. No. 1. Pp. 311–319.
17. *Schmid G.* ETFE cushions and their thermal and climatic behavior. In: Tensinet Symposium. Milan, Italy, 2007. Pp. 115–125.
18. *Hu J., Chen W., Zhao B., Song H.* Experimental studies on summer performance and feasibility of a BIPVT ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) cushion structure system. *Energy and Buildings*. 2014. V. 69. No. 1. Pp. 394–406.
19. *Hu J., Chen W., Zhao B., Song H.* Experimental studies on system performance of PV-ETFE cushion system in winter. *The Journal of Zhejiang University*. 2014. V. 48. No. 10. Pp. 1816–1821.
20. *Zanelli A., Beccarelli P., Monticelli C., Maffei R., Ibrahim H.M.* Technical and manufacturing aspects in order to create a smart façade system with OPV integrated into ETFE foils. In: International Symposia IASS-APCS. Seoul. Korea, 2012.
21. *Zehentmaier S.* Plenochnye ftoropolimery [Film fluoropolymers]. *Polimernye materialy. Izdeliya, oborudovanie, tekhnologii*. 2018. No. 8. Pp. 30–38. (transl. from Germ.)
22. *Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K.* Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer: 1: Crystal structure. *Polymer*. 1986. V. 27. No. 7. Pp. 999–1006.
23. *Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K.* Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer: 2: Transition from crystal phase to mesophase. *Polymer*. 1986. V. 27. No. 10. Pp. 1521–1528.
24. *Kawabata M.* Viscoplastic properties of ETFE film and structural behavior of film cushion. In: International Association for Shell and Spatial Structures Symposium. Venice, Italy, 2007.

#### Сведения об авторах

*Овсянников Сергей Николаевич*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [ovssn@tsuab.ru](mailto:ovssn@tsuab.ru)

*Околичный Василий Николаевич*, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [okolichnyi@mail.ru](mailto:okolichnyi@mail.ru)

*Овсянников Александр Николаевич*, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [anovs@mail.ru](mailto:anovs@mail.ru)

*Лелюга Ольга Владимировна*, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [olga.startseva27@gmail.com](mailto:olga.startseva27@gmail.com)

*Самохвалов Александр Сергеевич*, инженер, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, [tomsk117@mail.ru](mailto:tomsk117@mail.ru)

#### Authors Details

*Sergei N. Ovsyannikov*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [ovssn@tsuab.ru](mailto:ovssn@tsuab.ru)

*Vasilii N. Okolichnyi*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [okolichnyi@mail.ru](mailto:okolichnyi@mail.ru)

*Aleksandr N. Ovsyannikov*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [anovs@mail.ru](mailto:anovs@mail.ru)

*Ol'ga V. Lelyuga*, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [olga.startseva27@gmail.com](mailto:olga.startseva27@gmail.com)

*Aleksandr S. Samokhvalov*, Engineer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, [tomsk117@mail.ru](mailto:tomsk117@mail.ru)