

С.Н. ОВСЯННИКОВ<sup>1,2</sup>, В.Н. ОКОЛИЧНЫЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия

## СИЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПЛЕНКИ ЭТФЭ\*

**Аннотация.** Исследования механических свойств пленки из этилен-тетрафторэтилена (ЭТФЭ) актуальны для широкого применения в строительстве светопрозрачных покрытий в климатических условиях России, особенно в арктической зоне. Силовые испытания выполнены для пленки толщиной 250 мкм на разрывной машине INSTRON, а также при равномерно распределенной нагрузке при положительных и отрицательных температурах. Установлен начальный модуль упругости по ГОСТ 34370-2017, который составил 1090 МПа. Для расчетов светопрозрачных покрытий выявлены три стадии нагружения. В упругой стадии работы пленки ЭТФЭ средний модуль упругости составил 35,8 МПа, в упруго-пластичной стадии – 1,78...2,71 МПа и в пластичной стадии работы – 0,06...0,086 МПа.

Силовые испытания мембраны из пленки ЭТФЭ толщиной 250 мкм на силовой треугольной раме при равномерно распределенной нагрузке до 8,577 кПа не привели к разрыву мембраны ни при положительных (+15...+18 °С), ни при отрицательных температурах (-23...-29 °С). Многократные механические повреждения (порезы) мембраны под нагрузкой 8,50 кПа при температуре -26 °С также не привели к ее разрыву. Прогибы мембраны при положительных температурах достигали 84 мм, при отрицательных температурах – 58,2 мм. Силовые испытания пленки ЭТФЭ показали ее сверхвысокие прочностные характеристики, что позволяет при локализации производства в России широко использовать ее для создания комфортной среды в сооружениях, возводимых в Арктике и на других территориях России.

**Ключевые слова:** пленка из этилен-тетрафторэтилена, механические испытания на разрыв, силовые испытания равномерно распределенной нагрузкой.

S.N. OVSYANNIKOV<sup>1,2</sup>, V.N. OKOLICHNYI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Scientific Research Institute of Construction Physics RAASN, Moscow, Russia

## POWER TESTING OF ETFE FILM\*

**Abstract.** Studies of mechanical properties of ethylene-tetrafluoroethylene (ETFE) film they are relevant for wide application in the construction of translucent coatings in the climatic conditions of Russia, especially in the Arctic zone. Power tests were performed for a film with a thickness of 250 microns on an INSTRON bursting machine, as well as with a uniformly distributed load at positive and negative temperatures. The initial modulus of elasticity according to GOST 34370-2017 was established, which was 1090 MPa. Three loading stages have been identified for the calculations of translucent coatings. In the elastic stage of operation of the ETFE film, the average modulus of elasticity was 35.8 MPa, in the elastic-plastic stage – 1.78...2.71 MPa and in the plastic stage of operation – 0.06...0.086 MPa.

© Овсянников С.Н., Околичный В.Н., 2022

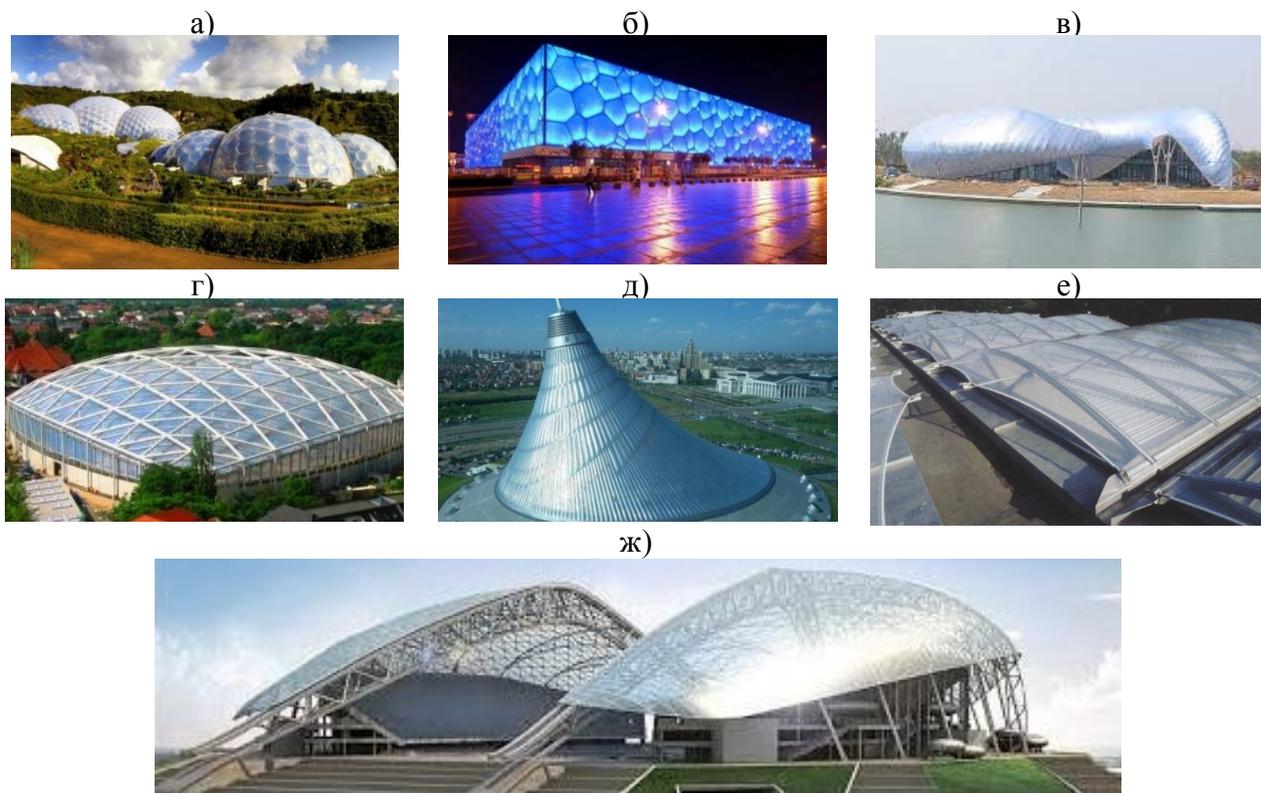
\* Исследование выполнено по заказу ФГУП «ГНПП «КРОНА» по теме «Поиск, исследование и анализ решений несущих, ограждающих конструкций и оснований для создания большепролетных климатических искусственных укрытий для условий районов Крайнего Севера и вечной мерзлоты» и при финансовой поддержке Министерства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

*Force tests of a membrane made of ETFE film with a thickness of 250 microns on a power triangular frame with a uniformly distributed load of up to 8,577 kPa did not lead to rupture of the membrane at any positive (+15 ...+18 °C) not at subzero temperatures (-23...-29 °C). Repeated mechanical damage (cuts) of the membrane under a load of 8.50 kPa at a temperature of -26 °C also did not lead to its rupture. The deflections of the membrane at positive temperatures reached 84 mm, at negative temperatures – 58.2 mm. Power tests of the ETFE film have shown its ultra-high strength characteristics, which makes it possible to widely use it to create a comfortable environment in structures erected in the Arctic and other territories of Russia when localizing production in Russia.*

**Keywords:** ethylene-tetrafluoroethylene film, mechanical tensile tests, power tests with evenly distributed load.

## Введение

Арктическая зона России богата огромными запасами углеводородов и других полезных ископаемых. На арктическом побережье России расположены порты, обеспечивающие работу Северного морского пути, на этой территории необходимо создание сети пунктов размещения объектов ВС и МЧС России. Развитие Российской Арктики требует новых подходов в создании среды жизнедеятельности человека, защищенной от сверхнизких температур (до -58 °C), ураганных ветров и обильных осадков в виде снега. Идеи строительства большепролетных светопрозрачных покрытий известны давно, но они во многом оставались футуристичными при отсутствии сверхлегких материалов и конструктивных быстровозводимых систем. В последние десятилетия и в России, и в мире начали широко применять фторопласты. За рубежом производится пленка из этилен-тетрафторэтилена (ЭТФЭ) различной толщины, которая широко применяется в гражданском строительстве при возведении большепролетных покрытий в составе пневматических подушек в один или несколько слоев. Десятки объектов построены за рубежом, ряд объектов построен и успешно эксплуатируется в России (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Покрытия сооружений из пленки 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; ж) олимпийский стадион «Фишт», г. Сочи**



**Рисунок 1 – Покрытия сооружений из пленки ЭТФЭ:**  
з) стадион «Газпром Арена», г. Санкт-Петербург;  
и) светопрозрачное покрытие стадиона «Казань-Арена», г. Екатеринбург

Применение пленок ЭТФЭ позволяет реализовать практически любые идеи и замыслы архитекторов в создании объемных композиций, что обусловлено не только архитектурной выразительностью таких сооружений, но и возможностью противостоять мощным ветрам, выдерживать низкие температуры и интенсивное воздействие ультрафиолетового излучения. Работоспособность пленки ЭТФЭ проверена и в условиях высокогорья (рисунок 2).



**Рисунок 2 - Верхняя станция канатной дороги на лыжной горе Гайслахкогель, Австрия**

Пленка ЭТФЭ обладает уникальными прочностными и физико-техническими свойствами, имеет малый объемный вес, высокие характеристики светопропускания, устойчива к солнечной радиации, безопасна при пожаре, а срок эксплуатации таких покрытий достигает 50 лет. Исследованиям свойств пленки ЭТФЭ и ее применению посвящен целый ряд отечественных и зарубежных работ [1-18].

В работе [2] приведены механические характеристики для пленок ЭТФЭ различной толщины, из которой следует, что при увеличении толщины пленки от 50 до 350 мкм прочность на растяжение постепенно снижается от 64...56 МПа до 40 МПа.

Свойства пленки из ЭТФЭ отличаются в ряде случаев от свойств пленки из политетрафторэтилена (ПТФЭ) (фторопласт-4, тефлон) как в лучшую, так и худшую стороны. Например, температура плавления и максимальная температура эксплуатации на 50-70 °С ниже, чем у пленки ПТФЭ, термостойкость, химическая стойкость, коэффициент трения также уступают ПТФЭ, однако, у пленки ЭТФЭ более высокие механические свойства: прочность, сопротивление ползучести, прорезанию, истиранию, раздиру; хорошая формуемость методами экструзии и литья под давлением; меньшая плотность [3]. Температура оказывает существенное влияние на модуль упругости при сжатии и растяжении. При температурах от -100 °С до +100 °С модуль упругости при растяжении снижается в 10 раз – с 2120 МПа до 210 МПа.

Прочность на разрыв ЭТФЭ, содержащего 55% (мол.) ТФЭ, резко падает в диапазоне температур от  $-190^{\circ}\text{C}$  до  $-110^{\circ}\text{C}$ , но уже при  $-100^{\circ}\text{C}$  появляется пластичность. Относительное удлинение при разрыве при  $+120^{\circ}\text{C}$  достигает 800 %, при дальнейшем повышении температуры оно снижается и при  $+200^{\circ}\text{C}$  становится равным 50 % (рисунок 3). Ползучесть ЭТФЭ меньше, чем у ПТФЭ, поэтому сополимер ЭТФЭ в меньшей степени деформируется под нагрузкой и обладает лучшей устойчивостью к хладотекучести. Пленка, полученная экструзией из расплава или из суспензий при толщине 20...100 мкм, имеет разрушающее напряжение 30...50 МПа.

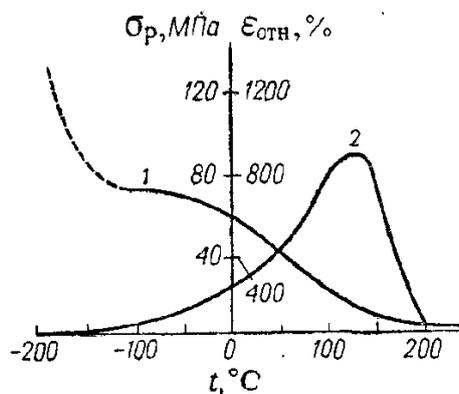


Рисунок 3 – Влияние температуры на разрушающее напряжение и относительное удлинение ЭТФЭ [3]:  
1 – разрушающее напряжения при растяжении  $\sigma_p$ ; 2 – относительного удлинения при разрыве  $\epsilon_{отн}$

В работе [11] показаны результаты исследований пленок ЭТФЭ на кратко- и долговременные свойства ползучести. Были проведены две серии кратковременных испытаний на ползучесть и восстановление, в ходе которых наблюдалась остаточная деформация. Также было проведено длительное испытание пленки ЭТФЭ на ползучесть, которое длилось около 400 дней. Основываясь на испытаниях, создана вязкоупругопластическая модель для описания кратковременной ползучести и восстановления пленки ЭТФЭ. Используя это уравнение, были предсказаны долгосрочные характеристики ползучести.

Мембранные конструкции [19] при незначительных повреждениях пленки можно отремонтировать на месте, а при более серьезных повреждениях кассета или подушка из ЭТФЭ пленки легко заменима. Предел текучести и модуль упругости ЭТФЭ зависят от скорости деформации, а в полимерном материале с низкой кристаллизацией эти характеристики, как правило, зависят от времени, температуры и напряжения.

По версии авторов исследований [20, 21] структура ЭТФЭ является орторомбической с четырехплоскостной зигзагообразной цепью и имеет паракристаллическую природу. Прочные связи внутри фторполимера предотвращают деградацию материала под воздействием погодных условий и ультрафиолетового излучения. Таким образом, дополнительные покрытия для сохранения прочности ЭТФЭ не нужны. По этой причине пленка не портится и не теряет твердость в течение всего срока службы. Более того, пленка ЭТФЭ инертна к щелочной и кислотной среде, так же и к кислотным дождям. Строительные объекты с применением данной пленки могут эксплуатироваться в условиях с разной степенью агрессивности среды, в том числе в химических производствах, угольных месторождениях, рудных местах.

Практика строительства показала, что пленка ЭТФЭ использовалась в основном для пневматических ограждающих конструкций с умеренными условиями эксплуатации. Для суровых условий арктического побережья с низкими температурами и значительной ветровой нагрузкой необходимы дополнительные исследования.

В Томском государственном архитектурно-строительном университете (ТГАСУ) проведены лабораторные силовые испытания образцов пленки ЭТФЭ в климатических камерах. Программа силовых испытаний включала в себя испытания на растяжение образцов пленки ЭТФЭ 250 мкм на разрывной машине INSTRON и испытания ячейки с пленкой в силовой треугольной раме со стороной 1260 мм при равномерном загрузении (имитация снеговых и ветровых нагрузок) при положительных и отрицательных температурах.

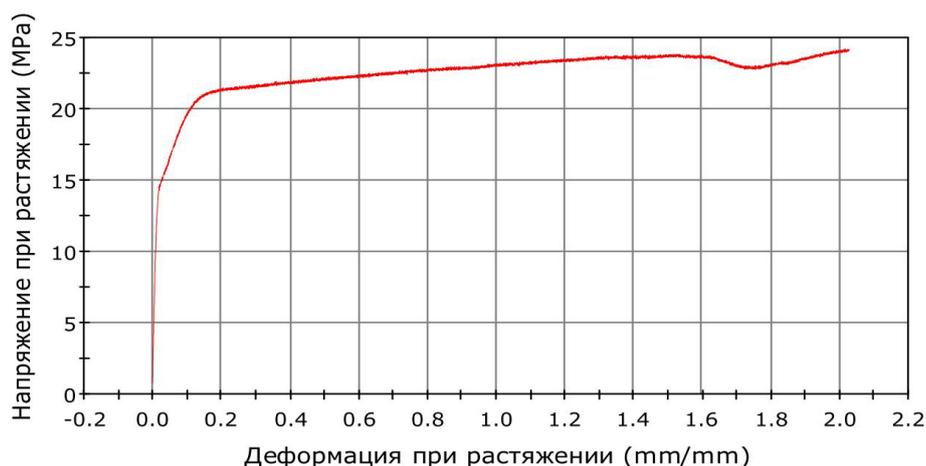
#### **Испытания пленки ЭТФЭ на разрыв**

Испытания пленки ЭТФЭ на разрыв выполнены на разрывной машине INSTRON для трех образцов пленки, шириной 27,3, 27,0, 26,9 мм и длиной 207, 137, 92 мм (рисунок 4).



**Рисунок 4 - Силовые испытания пленки ЭТФЭ**

Разрывная машина INSTRON создает пошаговое напряжение, и на каждом шаге выдает нагрузку, Н, напряжение, МПа и относительное удлинение, мм/мм. Результаты эксперимента представляются в виде таблиц Excel и графиков «напряжение-деформация». Так, например, для первого образца в табличном виде представлены нагрузки от 5,858 Н на 1 шаге и 164,841 Н на последнем 10068 шаге нагружения, удлинения составили на первом шаге 0,130 мм, на последнем шаге 419,364 мм. Здесь же определены напряжения на 1 шаге 0,856 МПа, на последнем шаге 24,126 МПа. Общее время нагружения образца составляло 1006,176 с. График «напряжение-деформация» для первого образца показан на рисунке 5.



**Рисунок 5 - График «напряжение-деформация» испытания пленки ЭТФЭ**

На рисунке 5 представлена зависимость «напряжение – деформация», которая имеет 3 характерных участка: начальный «упругий» с высоким модулем упругости для всех образцов 35,8 МПа, второй «упруго-пластичный» с модулем упругости 1,78...2,71 МПа, и «пластичный» с модулем упругости 0,06...0,086 МПа. Такая зависимость повторялась для всех исследованных образцов, при этом, ни один из них не удалось разорвать в связи с

ограниченностью хода разрывной машины. Определен и начальный модуль упругости по ГОСТ 34370-2017<sup>†</sup> в диапазоне нагрузок, соответствующих относительному удлинению 0,1...0,3 %, его среднее значение для образцов пленки ЭТФЭ 250 мкм составило 1090 МПа, что несколько ниже, чем по результатам зарубежных исследователей [17-20].

Исследования на разрывной машине показали, что для проектирования пленочных конструкций следует произвести более обширные исследования пленочных материалов ЭТФЭ с целью определения расчетных модулей упругости в разных режимах нагружения. Особый интерес представляют измерения при отрицательных температурах, близких к расчетным температурам (-55 °С) и абсолютно минимальным температурам (-63 °С) в Арктике.

### ***Силовые испытания треугольной ячейки с пленкой ЭТФЭ***

Силовые испытания мембраны из пленки ЭТФЭ толщиной 250 мкм производились в климатических камерах ТГАСУ равномерно распределенными нагрузками, моделирующими снеговые и ветровые нагрузки. В соответствии со СП 20.13330.2016<sup>‡</sup> арктические территории России по весу снегового покрова находятся в III и IV снеговых районах, а по давлению ветра – в III...VII ветровых районах со снеговой нагрузкой до 2,0 кПа и нормативным ветровым давлением до 0,85 кПа.

Учитывая различные возможные сочетания нагрузок на мембрану ЭТФЭ наружного слоя оболочки, возможность образования «снеговых мешков», принято решение выполнить нагружение мембраны толщиной 250 мкм до 8,5 кПа при положительных и отрицательных температурах. Для проведения эксперимента были изготовлены силовые рамы треугольной формы с размерами, соответствующими проектным размерам ячеек проектируемого укрытия со стороной 1260 мм, пленки ЭТФЭ крепилась на них с использованием прижимных планок (рисунок 6). Всего изготовлено и испытано шесть образцов пленки: три при положительных температурах +15...+18 °С и три при отрицательных температурах -23...-29 °С.



***Рисунок 6 - Силовая рама с мембраной из пленки ЭТФЭ***

Нагружение производилось плавно в 16 этапов (в среднем 15 минут на 1 этап) путем размещения на мембране мешочков с песком, предварительно навешанных по  $1,0 \pm 0,04$  кг. Нагрузка на этапе составляла около 28 кг. В свету силовой рамы площадь нагружаемой пленки составляла  $0,528 \text{ м}^2$ . На 16 этапе мембрана нагружалась равномерной нагрузкой до 452,9 кгс, что соответствовало распределенной нагрузке  $857,7 \text{ кгс/м}^2$  или 8,577 кПа (рисунок 7). В процессе испытаний производилось выдерживание мембраны под нагрузкой с

<sup>†</sup> ГОСТ 34370-2017. Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. М.: Стандартиформ. 2018. 21 с.

GOST 34370-2017. Plastics. Determination of mechanical properties during stretching. M.: Standartinform. 2018. 21 p. (In Russian).

<sup>‡</sup> СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. М.: Стандартиформ. 2018. 95 с.

SP 20.13330.2016 Loads and impacts. Updated version of SNiP 2.01.07-85\*. Moscow: Standartinform. 2018. 95 p. (In Russian).

целью определения дополнительных прогибов во времени. На каждом этапе производилось определение прогибов по центру мембраны с использованием лазерного дальномера с точностью измерения 1 мм.



*Рисунок 7 - Силовые испытания пленки ЭТФЭ на 16 этапе загрузки при положительной температуре*

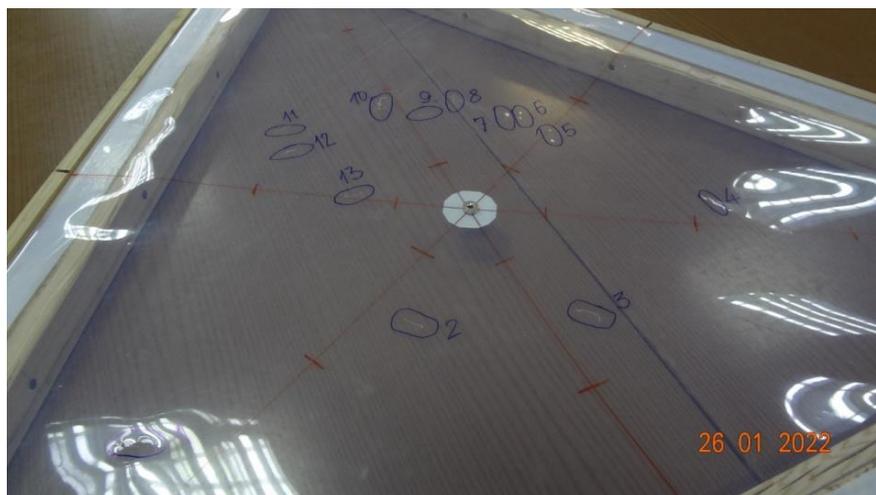
После разгрузки мембраны и ее снятия с рамки производилось измерение толщины мембраны после растяжения с применением микрометра МКЦ-25. Было выявлено, что толщина пленки ЭТФЭ до эксперимента составляла 250 мкм, после нагружения 245 мкм, т. е. толщина пленки по центру исследуемой мембраны уменьшилась на 5 мкм.

По итогам силовых испытаний пленки ЭТФЭ толщиной 250 мкм выявлено, что прогибы пленки при нагрузках до 8,5 кПа не превышали 84 мм, при положительных температурах и 58,2 мм при отрицательных температурах, а сама пленка не подавала признаков разрушения (рисунок 8). При разгрузке пленка практически восстанавливает первоначальную форму в течение нескольких дней.



*Рисунок 8 - Силовые испытания пленки ЭТФЭ на 16 этапе загрузки при отрицательной температуре*

На последнем образце, нагруженном равномерно распределенной нагрузкой 8,581 кПа, были выполнены порезы мембраны ножом (13 раз) при температуре в камере -26 °С, однако это не привело к разрушению мембраны (рисунок 9).



*Рисунок 9 - Мембрана из пленки ЭТФЭ с порезами после снятия нагрузки*

### Выводы

Испытания пленки из этилен-тетрафторэтилена показали, что этот материал обладает сверхвысокими прочностными характеристиками, как при положительных, так и при отрицательных температурах, устойчив к повреждениям целостности мембраны. При условии создания в России производства пленки ЭТФЭ, этот материал, безусловно, очень перспективен для возведения сооружений укрытий самого различного назначения. С его использованием возможна реализация масштабных проектов развития арктической зоны России. Вместе с тем, исследования показали, что для проектирования пленочных конструкций требуется более детальное изучение механических свойств пленочных материалов ЭТФЭ, особенно при низких температурах до -60 °С.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новое в технологии соединений фтора: Пер. с японск./ Под ред. Н. Исикавы. М.: Мир, 1984. 592 с.
2. Houtman R. Materials used for architectural fabric structures / in Llorens J.I // Fabric Structures in Architecture. Woodhead Publishing. Boston. MA. 2015. Pp. 101-120.
3. Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. Л.: Химия, 1978. 232 с.
4. Robinson-Gayle S., Kolokotroni M., Cripps A., Tanno S. ETFE foil cushions in roofs and atria // Constr. Build. Mater. 2001. No. 15 (7). Pp. 323–327.
5. Chilton J. Lightweight envelopes: ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture // Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater. 2013. No. 166 (6). Pp. 343–357.
6. Chilton J., Lau B. Lighting and the visual environment in architectural fabric structures, in: Fabric Structures in Architecture. 2015. Pp. 203–219.
7. Robinson L.A. Structural Opportunities of ETFE (Ethylene Tetra Fluoro Ethylene), Massachusetts Institute of Technology. 2005. 66 p.
8. Hu J., et al. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior // Construction and Building Materials. 2017. No. 131. Pp. 411-422.
9. Charbonneau L., Polak M.A., Penlidis A. Mechanical properties of ETFE foils: testing and modelling // Constr. Build. Mater. 2014. No. 60. Pp. 63–72.
10. Li Y., Wu M. Uniaxial creep property and viscoelastic-plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil // Mech. Time-Depend. Mater. 2015. No. 19 (1). Pp. 21–34.
11. 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. No.16 (4). Pp.38–43.
12. Hu J., Chen W., Sun R., Zhao B., Luo R. Mechanical properties of ETFE foils under uniaxial cyclic tensile loading // Build. Mater. 2015. No.18 (1). Pp. 69–75.

13. Hu J., Chen W., Luo R., Zhao B., Sun R. Uniaxial cyclic tensile mechanical properties of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils // *Constr. Build. Mater.* 2014. No. 63 (1). Pp. 311–319.
14. Schmid G. ETFE cushions and their thermal and climatic behaviour, in: *Tensinet Symposium*, Milan, Italy. 2007. Pp. 115–125.
15. 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. No.69 (1). Pp.394–406.
16. 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. No. 48 (10). Pp. 1816–1821.
17. Zehentmaier S. *Fluoropolymers in Film Applications // 27th Annual World Symposium on Performance Films*. Duesseldorf. April. 2012.
18. Цеентмайер С. Пленочные фторполимеры / пер. А. П. Сергеевкова // *Полимерные материалы*. 2018. № 8. С. 30–38.
19. Chen W. *Design of Membrane Structure Engineering*, China Building Industry Press. 2010.
20. Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K. Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer 1. Crystal structure, *Polymer*. 1986. No.27 (7). Pp. 999–1006.
21. 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. *New in the technology of fluorine compounds: Per. from Japanese / Ed. N. Ishikawa*. M.: Mir. 1984. 592 p.
2. Houtman R. *Materials used for architectural fabric structures / in Llorens J.I // Fabric Structures in Architecture*. Woodhead Publishing. Boston. MA. 2015. Pp. 101-120.
3. Panshin Yu.A. Malkevich S.G., Dunaevskaya Ts.S. *Fluoroplasts*. L.: Chemistry, 1978. 232 p.
4. Robinson-Gayle S., Kolokotroni M., Cripps A., Tanno S. ETFE foil cushions in roofs and atria // *Constr. Build. Mater.* 2001. No. 15 (7). Pp. 323–327.
5. Chilton J. *Lightweight envelopes: ethylene tetra-fluoro-ethylene foil in architecture // Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater.* 2013. No. 166 (6). Pp. 343–357.
6. Chilton J., Lau B. *Lighting and the visual environment in architectural fabric structures, in: Fabric Structures in Architecture*. 2015. Pp. 203–219.
7. Robinson L.A. *Structural Opportunities of ETFE (Ethylene Tetra Fluoro Ethylene)*, Massachusetts Institute of Technology. 2005. 66 p.
8. Hu J., et al. *Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior // Construction and Building Materials*. 2017. No. 131. Pp. 411-422.
9. Charbonneau L., Polak M.A., Penlidis A. *Mechanical properties of ETFE foils: testing and modelling // Constr. Build. Mater.* 2014. No. 60. Pp. 63–72.
10. Li Y., Wu M. *Uniaxial creep property and viscoelastic-plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil // Mech. Time-Depend. Mater.* 2015. No. 19 (1). Pp. 21–34.
11. 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. No.16 (4). Pp.38–43.
12. Hu J., Chen W., Sun R., Zhao B., Luo R. *Mechanical properties of ETFE foils under uniaxial cyclic tensile loading // Build. Mater.* 2015. No.18 (1). Pp. 69–75.
13. Hu J., Chen W., Luo R., Zhao B., Sun R. *Uniaxial cyclic tensile mechanical properties of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils // Constr. Build. Mater.* 2014. No. 63 (1). Pp. 311–319.
14. Schmid G. *ETFE cushions and their thermal and climatic behaviour, in: Tensinet Symposium*, Milan, Italy. 2007. Pp. 115–125.
15. 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. No.69 (1). Pp.394–406.
16. 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. No. 48 (10). Pp. 1816–1821.
17. Zehentmaier S. *Fluoropolymers in Film Applications // 27th Annual World Symposium on Performance Films*. Duesseldorf. April. 2012.
18. Tseentmayer S. *Film fluoropolymers / per. A. P. Sergeevkova // Polymer materials*. 2018. No. 8. Pp. 30-38.
19. Chen W. *Design of Membrane Structure Engineering*, China Building Industry Press. 2010.
20. Tanigami T., Yamaura K., Matsuzawa S., Ishikawa M., Mizoguchi K., Miyasaka K. *Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer 1. Crystal structure, Polymer*. 1986. No.27 (7). Pp. 999–1006.
21. Kawabata M. *Viscoplastic Properties of ETFE Film and Structural Behavior of Film Cushion*, International Association for Shell and Spatial Structures Symposium, Venice, Italy, 2007.

**Информация об авторах:**

**Овсянников Сергей Николаевич**

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия,  
доктор технических наук, профессор.

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия,  
главный научный сотрудник.

E-mail: [ovssn@tsuab.ru](mailto:ovssn@tsuab.ru)

**Околичный Василий Николаевич**

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия,  
кандидат технических наук, доцент.

E-mail: [okolichnyi@mail.ru](mailto:okolichnyi@mail.ru)

**Information about authors:**

**Ovsyannikov Sergey N.**

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia,  
doctor of technical sciences, professor.

Scientific Research Institute of Construction Physics RAASN, Moscow, Russia,  
chief researcher.

E-mail: [ovssn@tsuab.ru](mailto:ovssn@tsuab.ru)

**Okolichny Vasily N.**

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia,  
candidate of technical sciences, associate professor.

E-mail: [okolichnyi@mail.ru](mailto:okolichnyi@mail.ru)