

УДК 624.011.8:678.743.3

DOI 10.32683/1815-5987-20

Александр Александрович Селезнёв,

НГАСУ (СИБСТРИН), г. Новосибирск, Россия

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ETFE-ПЛЕНКИ

Аннотация. Статья посвящена анализу эксплуатационных характеристик и обоснованию параметров оптимизации светопрозрачных кровельных систем на основе этилен-тетрафторэтилена (ETFE). В работе проведено сопоставление физико-технических показателей фторполимерных мембран с традиционными полимерами, такими как ПВХ, поликарбонат и органическое стекло. Установлено, что минимальный удельный вес ETFE способствует сокращению постоянных нагрузок на каркас здания до 100 раз по сравнению с остеклением, создавая условия для проектирования облегченных большепролетных покрытий. Особое внимание уделено исследованию напряженно-деформированного состояния трехслойных пневматических подушек. В статье представлены данные по вязкоупругому поведению материала и определены значения коэффициента ползучести, необходимые для обеспечения долговечности зажимных узлов. Предложенные инженерные решения по настройке натяжения кромок мембраны в алюминиевом профиле исключают риски разрыва в зонах концентрации напряжений.

Ключевые слова: ETFE-пленка, светопрозрачные конструкции, пневматические подушки, оптимизация массы, трехслойная мембрана, напряженно-деформированное состояние, вязкоупругость.

Abstract. This article analyzes the performance characteristics and substantiates optimization parameters for translucent roofing systems based on ethylene-tetrafluoroethylene (ETFE). The study compares the physical and technical properties of fluoropolymer membranes with those of traditional polymers such as PVC, polycarbonate, and organic glass. It was found that the minimal specific gravity of ETFE helps reduce dead loads on the building frame by up to 100 times compared to glazing, paving the way for the design of lightweight, long-span roofs. Particular attention is paid to the stress-strain state of three-layer air cushions. The article presents data on the viscoelastic behavior of the material and determines the creep coefficient values required to ensure the durability of clamping assemblies. The proposed engineering solutions for adjusting membrane edge tension in aluminum profiles eliminate the risk of rupture in stress concentration zones.

Keywords: ETFE film, translucent structures, air cushions, mass optimization, three-layer membrane, stress-strain state, viscoelasticity.

Введение. Современная архитектура диктует запрос на создание большепролетных сооружений, обладающих минимальной массой и высокой светопрозрачностью. Традиционные материалы, такие как стекло, обладают значительным удельным весом, что требует возведения массивных вспомогательных подсистем. Применение полимерных мембран, в частности этилен-тетрафторэтилена (ETFE), выступает инновационным решением для перекрытия стадионов, оранжерей и транспортных узлов [9]. Актуальность данной тематики обусловлена необходимостью снижения материалоемкости при сохранении долговечности и безопасности объектов.

Обзор состояния проблемы свидетельствует, что ETFE-пленки активно исследуются в контексте их технологических свойств и устойчивости к ультрафиолетовому излучению [3]. Однако вопросы оптимизации геометрии пневматических подушек и взаимодействия слоев в условиях

переменного внутреннего давления остаются изученными не в полной мере. Степень разработанности темы характеризуется наличием значительного объема экспериментальных данных по одноосному растяжению [4], но дефицитом методик комплексного расчета сложных пространственных систем.

Объектом исследования выступают светопрозрачные конструкции на базе фторполимерных пленок. Предмет исследования - закономерности изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) и эксплуатационных качеств несущих элементов при варьировании их структуры.

Целью работы является обоснование параметров оптимизации пневматических конструкций из ETFE для повышения их эффективности. Для достижения поставленной цели решаются задачи по сравнительному анализу материалов, изучению специфики трехслойных систем и оценке влияния внутреннего давления на несущую способность. Использование таких решений в гражданском строительстве, например, при проектировании покрытий аквапарков, подтверждает высокую практическую значимость подобных исследований [1].

Основная часть:

Методы исследования. В ходе работы применялся метод сравнительного технико-экономического анализа физических свойств полимеров. Расчет НДС проводился с использованием положений теории мягких оболочек. Экспериментальные данные, полученные в ходе силовых испытаний [4, 7], легли в основу верификации теоретических моделей.

Решение научной задачи. Оптимизация конструкции предполагает подбор толщин слоев и конфигурации внутреннего пространства пневматической подушки. На Рисунке 1 приведена схема оптимизированной пневматической системы, состоящей из трех слоев пленки различного функционального назначения.

СХЕМА ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ETFE

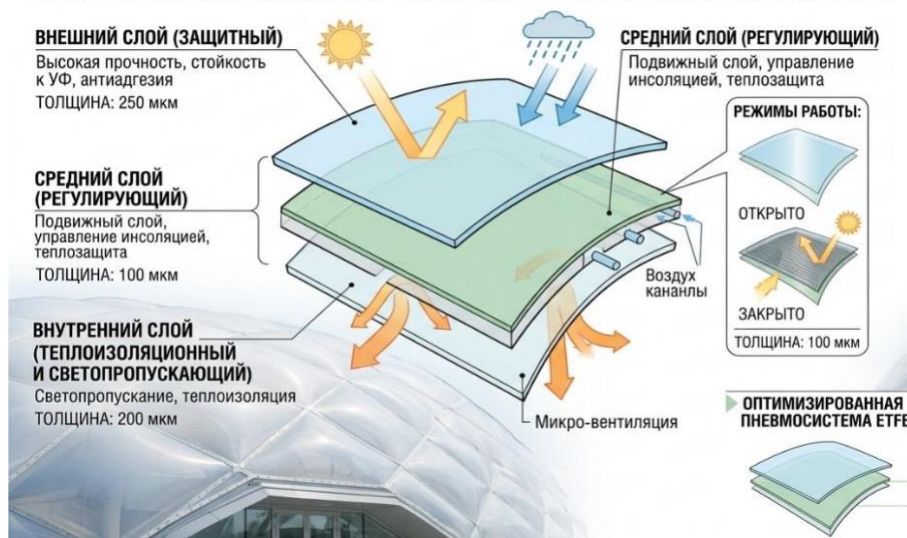


Рис. 1. Трехслойная пневматическая конструкция: (ETFE прозрачная 200 мкм + прозрачная 250 мкм + прозрачная ETFE 200 мкм)

Данная компоновка обеспечивает баланс между весом и жесткостью. Внешние слои толщиной 200 мкм воспринимают основные атмосферные нагрузки, в то время как срединный слой выполняет роль демпфера и теплового барьера.

Результаты. Анализ светопрозрачных материалов выявил неоспоримые преимущества фторполимеров. В таблице 1 систематизированы данные, характеризующие эксплуатационный потенциал ETFE в сопоставлении с альтернативами, используемых в кровельных конструкциях.

Таблица 1

Сравнительный анализ светопрозрачных кровельных материалов

Материал	Удельный вес, кг/м ²	Светопропускание, %	Срок службы, лет	Класс
				сс гор

				юче сти
ETFE плёнка	0,25	93	40	Г1
Профили рованный ПВХ	1,35	70	8	Г2
Монолит ный поликарб онат	4,80	88	18	Г2
Сотовый поликарб онат	2,15	76	11	Г1
Органиче ское стекло	4,50	92	25	Г4
Силикатн ое стекло (триплекс /закаленн ое)	25,00	89	50+	НГ

Результаты сопоставления физико-технических характеристик материалов в таблице 1 подтверждают превосходство ETFE-пленки по совокупности параметров, определяющих металлоемкость и долговечность кровельных систем. Минимальный удельный вес материала (0,25 кг/м²) обуславливает резкое снижение постоянных нагрузок на каркас здания. В сравнении с монолитным поликарбонатом (4,80 кг/м²) вес

светопрозрачного заполнения уменьшается почти в 20 раз, а в сопоставлении со светопрозрачными конструкциями на основе силикатного стекла в 100 раз [5]. Данное обстоятельство открывает возможности для проектирования большепролетных покрытий с облегченными фермами и вантовыми системами.

Помимо весовых характеристик, критическим преимуществом ETFE-пленки перед силикатным стеклом является безопасность при разрушении. Традиционное стекло, обладая высокой хрупкостью, при превышении расчетных нагрузок или механическом воздействии образует тяжелые фрагменты с острыми режущими кромками. Возникновение подобных «поражающих факторов» создает прямую угрозу жизни людей внутри здания и требует установки дополнительных защитных сеток или использования дорогостоящего многослойного триплекса, что еще больше увеличивает массу системы.

В отличие от стекла, полимерная мембрана ETFE эластична, не подвержена хрупкому разрушению и при экстремальных нагрузках (например, проколе или взрывной волне) не образует осколков, сохраняя структурную целостность или плавно деформируясь без отделения опасных частиц. Также стоит отметить высокую самоочищаемость и антиадгезионные свойства поверхности пленки, что снижает эксплуатационные расходы по сравнению с силикатным стеклом, требующим регулярной профессиональной очистки для поддержания уровня инсоляции.

Высокий показатель светопропускания (93%) в сочетании со сроком службы 40 лет обеспечивает энергоэффективность объекта на протяжении всего жизненного цикла. В отличие от профилированного ПВХ или сотового поликарбоната, подверженных деструкции под воздействием УФ-излучения через 8–11 лет, ETFE-пленка сохраняет оптическую прозрачность и эластичность [7]. Относительная инертность к внешним

факторам и принадлежность к классу горючести Г1 минимизируют риски при эксплуатации крупногабаритных общественных пространств.

Оптимизация несущих конструкций при использовании ETFE происходит за счет снижения массы кровельного покрытия, которое связано с изменением сечений основных несущих элементов. При переходе на пневматические подушки из ETFE возникают следующие инженерные эффекты:

1. Снижение материалоемкости. Малый собственный вес пленки переводит основную расчетную нагрузку в плоскость воздействия климатических факторов (снег, ветер), исключая избыточный запас прочности на поддержание массы самой кровли [4].

2. Эффективность соединительных узлов. Оптимизация толщины мембраны в диапазоне 200–300 мкм влияет на прочность зажимных соединений в алюминиевом профиле. Исследования подтверждают, что подбор толщины нивелирует риск возникновения пиковых концентраций напряжений в зонах фиксации [10].

3. Взаимодействие с каркасом. Использование трехслойных структур с внутренним избыточным давлением создает эффект предварительного напряжения. Пленка в среднем слое повышает жесткость системы, предотвращая чрезмерные деформации каркаса при отрицательном ветровом давлении.

Физические параметры ETFE создают условия для перехода от массивных стальных рам к легким сетчатым оболочкам. Поддержание внутреннего давления в камерах (200–800 Па) гарантирует сохранение проектной геометрии покрытия при минимизации сечения стропильных конструкций, что подтверждает целесообразность применения фторполимеров в современной строительной практике. В таблице 2 представлены результаты анализа физико-механических свойств исследуемой трехслойной структуры.

Таблица 2

Физико-механические параметры слоев конструкции

Параметр слоя / Характери стика	Внеш ний слой	Сред ний слой	Внутрен ний слой	Силикат ное стекло (закален ное)
Толщина пленки, мкм	250	100	200	4000 (4 мм)
Предел прочности при растяжени и, МПа	48	42	46	50–120
Модуль упругости, МПа	875	800	850	72 000
Относител ьное удлинение при разрыве, %	450	380	420	~0 (хрупкое)
Рабочее давление в камере, Па	450	0	450	н/д

Коэффициент ползучести (1000 ч)	0,02	0,025	0,02	0
---------------------------------	------	-------	------	---

Данные таблицы 2 подтверждают дифференцированный подход к подбору толщин и прочностных характеристик слоев пневматической панели. Внешний слой толщиной 250 мкм обладает наивысшим пределом прочности (48 МПа) и модулем упругости (875 МПа), что обосновано необходимостью восприятия максимальных атмосферных воздействий (снеговой покров, ветровой напор). Средний слой (100 мкм) выполняет стабилизирующую роль, повышая общую жесткость подушки. Внутренний слой (200 мкм) обеспечивает герметичность системы и участвует в поддержании рабочего давления 450 Па.

Сопоставление с показателями силикатного стекла выявляет принципиальные различия в работе материалов под нагрузкой. Несмотря на сопоставимый предел прочности, модуль упругости стекла выше почти в 80 раз, что свидетельствует о его чрезвычайной жесткости. В сочетании с практически нулевым относительным удлинением это предопределяет хрупкий характер разрушения стекла. При превышении предела прочности стекло мгновенно разрушается с образованием поражающих осколочных факторов, в то время как ETFE-пленка благодаря пластичности (удлинение свыше 400%) исключает риск внезапного обрушения и травмирования людей.

Учет коэффициента ползучести (0,02–0,025) для полимера является обязательным для обеспечения стабильности геометрии на длительный период эксплуатации [10]. Вязкоупругое поведение полимера, в отличие от абсолютно жесткого стекла, позволяет системе «адаптироваться» к локальным концентрациям напряжений, перераспределяя их по

поверхности оболочки, что значительно повышает общую живучесть светопрозрачной конструкции

Оптимизация несущих конструкций на основе данных параметров достигается через:

- Регулирование пневматического давления. Поддержание внутреннего давления на уровне 450 Па компенсирует прогибы пленки, снижая передачу изгибающих моментов на элементы каркаса. Нагрузка передается преимущественно в виде усилий растяжения, что способствует уменьшению сечения стропильных ног и прогонов [4].

- Повышение жесткости без утяжеления. Внедрение в средний слой пленки со специфическим модулем упругости (800 МПа) минимизирует колебания оболочки при ветровом подсосе. Стабилизация формы подушки исключает возникновение динамических резонансных явлений, воздействующих на узлы примыкания опорного контура [7].

- Герметичность и компенсация деформаций. Использование EPDM-уплотнителей в зажимном профиле в сочетании с высокой эластичностью ETFE обеспечивает сохранение расчетного давления при температурных расширениях металла. Правильный подбор натяжения кромок мембраны в зажимном профиле, опирающийся на представленные показатели прочности, исключает разрыв материала в точках концентрации напряжений [5].

Таким образом, прецизионный выбор физико-механических параметров каждого слоя создает условия для формирования надежной ограждающей оболочки с минимальными требованиями к жесткости подсистемы.

Применение пневматических объектов из данного материала оправдано для зданий с большими пролетами [5]. Оптимизация давления внутри камер (в диапазоне 200–800 Па) содействует поддержанию формы оболочки при снеговых нагрузках без существенного роста напряжений в материале. Результаты испытаний подтверждают, что правильный подбор натяжения

кромки в профиле нивелирует риски разрыва в зонах концентрации напряжений [4].

Обсуждение. Значение проведенного анализа заключается в подтверждении эффективности многослойных систем. Возможности использования в качестве среднего слоя солнечных батарей открывают новые горизонты в архитектурной физике, обеспечивая селективное светопропускание в зависимости от угла падения лучей [8]. Перспективы разработки проблемы видятся в интеграции гибких солнечных панелей непосредственно в структуру ETFE-подушек, что превратит кровлю в активный генератор энергии.

Внедрение подобных решений в практику современного строительства сталкивается с вопросами отсутствия общепринятых национальных стандартов на проектирование мягких оболочек. Однако зарубежный и отечественный опыт [2, 8] доказывает надежность данных систем. Оптимизация геометрии опорного контура и зажимных узлов является приоритетным направлением для снижения стоимости монтажных работ.

Инженерное совершенствование узла примыкания (кедер-профиль) предотвращает возникновение «мостиков холода» и конденсата, что критично для эксплуатации в условиях переменного климата. Полученные данные свидетельствуют: грамотная настройка параметров внутреннего давления выступает инструментом адаптивного управления жесткостью покрытия.

Выводы/заключение. Проведенное исследование выявило ряд закономерностей в поведении несущих систем на основе ETFE. Установлено, что трехслойная структура характеризуется повышенной энергоэффективностью и стабильностью формы. Сравнительный анализ подтвердил превосходство фторполимеров над традиционными светопрозрачными материалами по параметрам долговечности, энергоэффективности, веса и безопасности.

Оптимизация параметров зажимных профилей и толщин пленок приводит к повышению надежности большепролетных сооружений. Предложенные конструктивные решения способствуют снижению совокупных затрат на несущий каркас за счет уменьшения собственного веса ограждения. Полученные результаты могут быть использованы проектными организациями при разработке технической документации для пневматических строительных объектов. Дальнейшее развитие направления связано с поиском новых составов покрытий для регулирования оптических свойств мембран и конструктивных схем крепления многослойных пневматических модулей.

Список источников

1. Гранкина Е.В., Белова Е.М. Исследование применения пленки ETFE в покрытии аквапарка по несущим арочным конструкциям // Сборник материалов IX Всерос. научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая». Кемерово, 2017. С. 1–5.
2. Кунь У. Строительные мембраны, используемые в современных фасадах зданий // Современные проблемы лингвистики и методики преподавания русского языка в ВУЗе и школе. 2022. № 37. С. 1129–1141.
3. Овсянников С.Н., Околичный В.Н. Результаты механических испытаний пленки из этилен-тетрафторэтилена // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24, № 4. С. 89–98.
4. Овсянников С.Н., Околичный В.Н. Силовые испытания пленки ЭТФЭ // Строительство и реконструкция. 2022. № 5. С. 3–12.
5. Пшеничникова К.А. Материал будущего в строительстве пневматических воздухоопорных объектов: Пленка ETFE // Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ: материалы междунар. науч.-практ. конф. Москва, 2018. С. 512–514.

6. Соловьева Е.В., Боброва А.С., Сергеева Е.Ю. Современные светопрозрачные конструкции с использованием плёнок на основе ETFE-полимера // Научные труды КубГТУ. 2018. № 9. С. 332–342.
7. Юницкий А.Э., Малахов Р.А., Петровец А.Н. Исследование прочностных характеристик соединений плёнки ETFE для ограждающих конструкций большепролетных сооружений // Вестник БрГТУ. 2025. С. 75–83.
8. Cremers J., Marx H. Assessment of building Physical Aspects of a New Angular Selective 3D – Prototype Foil (ETFE) // Proceedings of TensiNet Symposium. 2019. P. 592–601.
9. Hu J., Chen W., Zhao B., Yang D. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 131. P. 411–422.
10. Karádi D.T., Hegyi D. An Extensive Review on the Viscoelastic-plastic and Fractural Mechanical Behaviour of ETFE Membranes // Periodica Polytechnica Architecture. 2021. Vol. 52, no. 2. P. 121–134.

References

1. Grankina E.V., Belova E.M. Study of the Use of ETFE Film in the Covering of a Water Park Using Supporting Arched Structures. *Collection of materials of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation "Young Russia"*. 2017. P. 1–5. (In Russ.).
2. Kun W. Building Membranes Used in Modern Building Facades. *Modern problems of linguistics and methods of teaching the Russian language in high school and school*. 2022; (37): 1129–1141. (In Russ.).
3. Ovsyannikov S.N., Okolichny V.N. Results of Mechanical Tests of Ethylene-Tetrafluoroethylene Film. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture*

- and Civil Engineering*. 2022; 24 (4): 89–98. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-89-98 (In Russ.).
4. Ovsyannikov S.N., Okolichny V.N. Strength Tests of ETFE Film. *Building and Reconstruction*. 2022; (5): 3–12. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-103-5-3-12 (In Russ.).
 5. Pshenichnikova K.A. Material of the Future in the Construction of Pneumatic Air-Supported Objects: ETFE Film. *Science, Education and Experimental Design. Proceedings of MARCHI: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. 2018. P. 512–514. (In Russ.).
 6. Solovieva E.V., Bobrova A.S., Sergeeva E.Y. Modern Translucent Structures Using Films Based on ETFE-Polymer. *Scientific works of KubSTU*. 2018; (9): 332–342. (In Russ.).
 7. Yunitski A.E., Malakhov R.A., Petrovets A.N. Investigation of Strength Characteristics of ETFE Film Connections for Enclosing Structures of Large-Span Structures. *Vestnik of BrSTU*. 2025. P. 75–83. (In Russ.).
 8. Cremers J., Marx H. Assessment of Building Physical Aspects of a New Angular Selective 3D – Prototype Foil (ETFE). *Proceedings of TensiNet Symposium 2019*. 2019. P. 592–601.
 9. Hu J., Chen W., Zhao B., Yang D. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior. *Construction and Building Materials*. 2017; (131): 411–422.
 10. Karádi D.T., Hegyi D. An Extensive Review on the Viscoelastic-plastic and Fractural Mechanical Behaviour of ETFE Membranes. *Periodica Polytechnica Architecture*. 2021; 52 (2): 121–134.