DOI: 10.65322/j.srd.05192026.44

ДЛИТЕЛЬНЫЕ ПРОГИБЫ ПУЛТРУЗИОННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ БАЛОК С УЧЁТОМ РАЗДЕЛЬНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ ИЗГИБЕ И СДВИГЕ И ПОДАТЛИВОСТИ УЗЛОВ

Дилшод Б.А., *магистр, главный инженер проекта, специальности «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», E-mail: dilshodakbarov0@gmail.com, «ТашГипрогор»*
Хуснитдин А.А., *д.т.н., профессор, кафедра технологии строительных материалов и конструкций E-mail: x.akromov@taqu.uz, Ташкентский архитектурно-строительный университет*

Аннотация. *Исследована длительная деформативность пултрузионной стеклопластиковой балки, входящей в независимый несущий каркас малоэтажного здания с ненесущими 3D-печатными стенами. Цель работы – определить, как раздельная ползучесть при изгибе и поперечном сдвиге, вращательная податливость соединений и момент установки ограждения влияют на прогиб и последующее уменьшение стенового зазора. Разработана линейно-вязкоупругая модель балки Тимошенко с двумя одинаковыми упругими вращательными пружинами. Наследственные операторы представлены цепочками Кельвина с тремя временами запаздывания; перераспределение опорного момента определяется совместно с деформациями, а не вводится постоянным коэффициентом. Решение получено через матричную экспоненту и проверено по мгновенному и асимптотическому упругим пределам. Все реологические коэффициенты являются явно заданными параметрами численного эксперимента, а не результатами испытания конкретного профиля. Для балки 300 × 150 × 12 мм пролётом 3,6 м при длительной нагрузке 9,45 кН/м и жёсткости каждого узла 15 МН·м/рад прогиб возрастает с 2,867 до 4,574 мм на условном горизонте 18 250 суток. Доля сдвиговой составляющей увеличивается с 26,9 до 37,0 %, а опорный момент – с 9,283 до 9,571 кН·м. Мгновенная огибающая с дополнительной нагрузкой 3,15 кН/м достигает 5,529 мм. При фиксации стенового зазора на 30-е сутки последующее расчётное сближение кромок составляет 2,341 мм, а не полный прогиб балки. Показано, что единый множитель ползучести способен как занижать, так и завышать результат. Сформулированы требования к идентификации реологических функций и условия, ограничивающие перенос аналитических результатов в проектную документацию.*

Annotatsiya. *Yuk ko‘tarmaydigan 3D-bosma devorlarga ega kam qavatli binoning mustaqil yuk ko‘taruvchi karkasi tarkibiga kiruvchi pultruzion shisha-plastik balkaning uzoq muddatli deformatsiyalanuvchanligi tadqiq qilindi. Ishning maqsadi – egilish va ko‘ndalang siljishdagi alohida sudraluvchanlik, birikmalarning aylanma (burchakli) elastik-siljuvchanligi hamda to‘siq devor montaj qilinish vaqtining egilishga va devor oralig‘i tirqishining keyingi qisqarishiga qanday ta’sir qilishini aniqlashdan iborat. Ikkita bir xil elastik aylanma prujinali Timoshenko balkasining chiziqli-qovushqoq-elastik modeli ishlab chiqildi. Irsiy operatorlar uchta kechikish vaqtiga ega Kelvin zanjirlari orqali ifodalandi; tayanch momentining qayta taqsimlanishi doimiy koeffitsiyent sifatida kiritilmasdan, deformatsiyalar bilan birgalikda aniqlanadi. Yechim matritsali eksponenta orqali olindi va oniy hamda asimptotik elastik chegaralar bo‘yicha tekshirildi. Barcha reologik koeffitsiyentlar aniq bir profil sinovi natijalari emas, balki sonli eksperimentning yaqqol berilgan parametrlari hisoblanadi. O‘lchamlari 300 × 150 × 12 mm, oraliq uzunligi 3,6 m bo‘lgan balka uchun 9,45 kN/m uzoq muddatli yuklama va*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.44

har bir tugunning qat'iyligi 15 MN·m/rad bo'lganda, shartli 18 250 sutkalik gorizontda egilish 2,867 dan 4,574 mm gacha ortadi. Siljish tashkil etuvchisining ulushi 26,9 dan 37,0 % gacha, tayanch momenti esa 9,283 dan 9,571 kN·m gacha ko'payadi. Qo'shimcha 3,15 kN/m yuklama bilan hosil bo'lgan oniy qobiq (egilish profili) 5,529 mm ga yetadi. Devor tirqishi 30-sutkada mahkamlangan holatda qirralarning keyingi hisobiy yaqinlashuvi balkaning to'liq egilishini emas, balki 2,341 mm ni tashkil etadi. Yagona sudraluvchanlik ko'paytuvchisi natijani pasaytirishi ham, orttirib yuborishi ham mumkinligi ko'rsatildi. Reologik funksiyalarni identifikatsiyalash bo'yicha talablar hamda analitik natijalarni loyiha hujjatlariga ko'chirishni cheklovchi shartlar shakllantirildi.

Abstract. *The long-term deformability of a pultruded glass fiber-reinforced polymer (GFRP) beam incorporated into an independent load-bearing frame of a low-rise building with non-load-bearing 3D-printed walls was investigated. The study aims to determine how decoupled creep in bending and transverse shear, rotational joint flexibility, and the installation timing of the wall enclosure affect deflections and the subsequent reduction of the wall clearance gap. A linear viscoelastic Timoshenko beam model restrained by two identical elastic rotational springs was developed. Hereditary integral operators are formulated using Kelvin chains with three retardation times; support moment redistribution is resolved simultaneously with deformations rather than introduced as an empirical constant coefficient. The governing equations were solved via matrix exponential formulation and validated against instantaneous and asymptotic elastic limits. All rheological coefficients serve as explicitly defined benchmark parameters of numerical experimentation rather than empirical data from a single specific profile test. For a 300 × 150 × 12 mm beam spanning 3.6 m under a sustained load of 9.45 kN/m and a rotational joint stiffness of 15 MN·m/rad per connection, the deflection increases from 2.867 to 4.574 mm over a nominal duration of 18,250 days. The shear contribution share rises from 26.9 to 37.0%, while the support moment increases from 9.283 to 9.571 kN·m. The instantaneous envelope incorporating an additional load of 3.15 kN/m reaches 5.529 mm. When fixing the wall clearance at day 30, the subsequent calculated clearance closure amounts to 2.341 mm rather than the total beam deflection. It is demonstrated that applying a single conventional creep multiplier can both underestimate and overestimate deflection behavior. Crucial requirements for identifying rheological functions and operational boundaries restricting the direct transfer of analytical findings into design documentation are formulated.*

Kalit so'zlar: *pultruzion shisha-plastik; GFRP; sudraluvchanlik; Timoshenko balkasi; aylanma prujina; irsiy model; siljish bo'shligi (elastikligi); uzoq muddatli egilish; deformatsion tirqish; yuk ko'tarmaydigan 3D-bosma devor.*

Keywords: *pultruded glass fiber-reinforced polymer; GFRP; creep; Timoshenko beam; rotational spring; hereditary model; shear compliance; long-term deflection; deformation clearance; non-load-bearing 3D-printed wall.*

Ключевые слова: *пултрузионный стеклопластик; GFRP; ползучесть; балка Тимошенко; вращательная пружина; наследственная модель; сдвиговая податливость; длительный прогиб; деформационный зазор; ненесущая 3D-печатная стена.*

Введение и постановка исследовательской задачи

В малоэтажном здании с композитным каркасом и 3D-печатным ограждением ограничение кратковременных напряжений не решает задачу сохранения эксплуатационной геометрии. Между верхом ненесущей стены и расположенным над ней ригелем необходим свободный ход, который может уменьшаться после монтажа вследствие длительного прогиба, изменения положения опор и температурных перемещений. В предыдущем расчётном исследовании каркаса рассматривалась мгновенная упругая работа

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.44

с учётом сдвига и податливости узлов [1]. Настоящая работа вводит временную координату и историю нагружения, сохраняя разделение несущей и ограждающей функций.

Исследования Sá и соавторов рассматривают ползучесть пултрузионных GFRP-элементов на уровне испытаний и аналитического описания [2, 3]. Работа Qiao, Barbero и Davalos показывает возможность построения линейно-вязкоупругой модели тонкостенных композитных балок с использованием принципа соответствия [4-8]. Эти публикации обосновывают выбор класса моделей, но их численные коэффициенты не могут автоматически характеризовать другой профиль, связующее или волокнистую архитектуру. Поэтому в настоящем исследовании реологический спектр не заимствуется как паспорт материала, а задаётся открыто для воспроизводимого сравнения.

Отдельный источник неопределённости связан с соединениями. Экспериментальные работы по пултрузионным рамным узлам рассматривают конечную вращательную жёсткость и различия между конструктивными вариантами [9, 10]. Однако даже при сохранении самой пружины упругой ползучесть балки изменяет относительную жёсткость системы «элемент – узел». Следовательно, опорный момент в статически неопределимой балке вообще не обязан оставаться постоянным.

Исследовательский вопрос сформулирован следующим образом: можно ли достоверно связать длительный прогиб ригеля и требуемый свободный ход стены, используя один коэффициент увеличения мгновенного прогиба? Для ответа сопоставляются наследственное решение, упрощённое масштабирование и метод эффективных модулей. Рассматривается также разница между полным прогибом и его приращением после установки ограждения.

Объект исследования, исходные данные и границы модели

Рассматривается отдельная балка постоянного сечения, имеющая неподвижные по вертикали опоры и одинаковые вращательные пружины на концах. Приложенная нагрузка равномерна и симметрична. Балка воспринимает нагрузку перекрытия; её совместная работа с настилом или полистиролбетонной плитой на сдвиг не задаётся. Стена не поддерживает балку и не включается в её жёсткость. Такая схема представляет локальную расчётную подсистему, а не полную модель здания.

Геометрия замкнутого профиля взята из эталонной постановки предыдущей рукописи [1] для сопоставимости результатов. Это не является окончательной спецификацией диссертационного объекта и не означает замены предусмотренных проектом двутавров или иных профилей. Для другого сечения меняются геометрические характеристики и результаты расчёта, но сохраняется предложенный алгоритм.

Таблица 1

Исходные параметры воспроизводимого расчёта

Параметр	Значение	Назначение и статус
Пролёт L	3,60 м	Геометрия эталонной балки
Высота × ширина × толщина	300 × 150 × 12 мм	Номинальное замкнутое сечение без радиусов углов
Площадь A	10 224 мм²	Вычислена по геометрии
Момент инерции I	116,741952 × 10^6 мм⁴	Изгиб относительно сильной оси
Эффективная площадь сдвига A_v	6 624 мм²	Две вертикальные стенки; к = 1,0
Мгновенный продольный модуль E_0	23 ГПа	Исследовательское допущение
Мгновенный модуль сдвига G_0	3,0 ГПа	Исследовательское допущение

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.44

Жёсткость одной пружины kθ	0; 1; 5; 15; ∞ МН·м/рад	Параметрическое сравнение; база – 15
Постоянная линейная нагрузка qG	8,10 кН/м	Заданный сценарный уровень
Переменная линейная нагрузка qQ	4,50 кН/м	Заданный сценарный уровень
Длительная доля переменной нагрузки ψ	0,30	Не нормативный коэффициент для конкретного помещения
Продолжительность расчёта	18 250 сут	Условный горизонт 50 × 365 суток

Длительная нагрузка и дополнительная кратковременная составляющая разделены до расчёта:

$$q_s = q_G + \psi q_Q = 9{,}45\ \text{kN/m}, \qquad q_v = (1-\psi) q_Q = 3{,}15\ \text{kN/m}. \tag{1}$$

В базовом случае q_s прикладывается ступенью в момент t = 0 и далее остаётся постоянной. q_v используется для мгновенной огибающей; отдельно рассматривается её приложение на семь суток. Такое разделение исключает ошибочное предположение, что вся переменная нагрузка действует непрерывно в течение 50 лет. Для реального объекта продолжительность действия и коэффициенты сочетаний устанавливаются по его назначению и применимым нормам.

Реологическое описание изгиба и сдвига

Применена линейная модель вязкоупругого отклика без физического старения материала: податливость зависит от времени, прошедшего после нагружения, но не от календарного возраста образца. Температура и влажность считаются постоянными. Вязкое течение с неограниченным ростом деформации, повреждение, ползучее разрушение, релаксация затяжки болтов и деградация связующего не включены. Положительные коэффициенты и времена запаздывания задают ограниченную во времени возрастающую податливость.

$$J_E(t) = \frac{1}{E_0}\left(1 + \sum_{i=1}^{3} a_i \left(1 - e^{-t/\tau_i}\right)\right). \tag{2}$$

$$J_G(t) = \frac{1}{G_0}\left(1 + \sum_{i=1}^{3} b_i \left(1 - e^{-t/\tau_i}\right)\right). \tag{3}$$

Таблица 2

Заданный спектр податливости; экспериментальная идентификация не проводилась

Ветвь i	**Время запаздывания τ_i, сут**	**a_i: изгиб**	**b_i: сдвиг**
1	30	0,12	0,30
2	365	0,18	0,45
3	3 650	0,20	0,45
Сумма коэффициентов	–	0,50	1,20

Асимптотическая податливость при изгибе в данном сценарии составляет 1,50/E_0, при сдвиге – 2,20/G_0. Это авторские параметры численного эксперимента. Они не обозначают нормативные коэффициенты условий работы и не получены экстраполяцией конкретной лабораторной серии. Номинальный горизонт 50 лет служит для сравнения откликов и сам по себе не подтверждает срок службы конструкции.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.44

Для произвольной истории обобщённого усилия f(t) вводится нормированный наследственный оператор. При нулевой предыстории его удобно вычислять через внутренние переменные:

$$\mathcal{C}_E(f) = f + \sum_i z_i^f, \qquad \tau_i \dot{z}_i^f + z_i^f = a_i f, \qquad z_i^f(0^-) = 0. \tag{4}$$

Для сдвига используется аналогичный оператор $\mathcal{C}_G$ с коэффициентами b_i. Размерность каждой внутренней переменной совпадает с размерностью соответствующего усилия. Поэтому при изменении нагрузки состояние сохраняется, а деформация определяется не только её текущим значением, но и всей предысторией. Для ступени f = const выражение (4) непосредственно воспроизводит (2).

4. Совместное решение для балки и вращательных пружин

Положительным считается модуль одинакового отрицательного опорного момента M. Вращение поперечного сечения на конце балки θ определяется изгибной частью кинематики Тимошенко. Его нельзя заменять полной производной прогиба, содержащей также сдвиговую составляющую. При симметричном нагружении связь момента и поворота имеет вид $M = k\theta\theta$.

Обозначим геометрические коэффициенты:

$$A_\theta = \frac{L^3}{24I}, \quad B_\theta = \frac{L}{2I}, \quad C_w = \frac{5L^4}{384I}, \quad D_w = \frac{L^2}{8I}. \tag{5}$$

Тогда совместность деформаций балки и узлов записывается как

$$\theta(t) = \frac{A_\theta \mathcal{C}_E(q) - B_\theta \mathcal{C}_E(M)}{E_0}, \qquad M(t) = k_\theta \theta(t). \tag{6}$$

Выделение текущего M из наследственного оператора даёт явное алгебраическое выражение для интегрирования:

$$M(t) = \frac{k_\theta}{E_0 + k_\theta B_\theta}\left(A_\theta\left(q + \sum_i z_i^q\right) - B_\theta \sum_i z_i^M\right). \tag{7}$$

Система (4), (7) содержит шесть внутренних переменных изгиба: три для истории q и три для истории M. При постоянной нагрузке это линейная система с постоянными коэффициентами. Её решение получено матричной экспонентой с добавлением постоянной компоненты нагрузки к вектору состояния. Сдвиговая часть при ступени вычисляется непосредственно по (3). При нескольких ступенях используется последовательное обновление состояния либо суперпозиция откликов.

Прогиб в середине пролёта разделяется на две составляющие:

$$w_b(t) = \frac{C_w \mathcal{C}_E(q) - D_w \mathcal{C}_E(M)}{E_0}. \tag{8}$$

$$w_s(t) = \frac{L^2}{8\kappa A_v G_0}\mathcal{C}_G(q), \qquad w(t) = w_b(t) + w_s(t). \tag{9}$$

Для шарнирной балки M = 0. Для жёстко закреплённых концов θ = 0 и $M = qL^2/12$ при рассматриваемой симметричной нагрузке. При конечном kθ момент изменяется во времени: материал балки становится податливее относительно упругих пружин, вследствие чего возрастает доля опорного защемления. Одновременно растёт деформация материала. Эти процессы действуют в противоположных направлениях и не заменяются простым множителем для полного прогиба.

5. Вычислительная проверка и воспроизводимость

Геометрические характеристики определены непосредственно по номинальным размерам. Во всех формулах использованы метры, ньютоны, паскали и сутки; перевод в миллиметры и килоньютон-метры выполнен только при представлении результатов. Важна

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.44

именно такая последовательность, поскольку подстановка I в мм⁴ при E в Па создаёт ошибку на двенадцать порядков.

Мгновенный предел решения проверен независимой упругой формулой балки с одинаковыми пружинами. Асимптотический предел проверен той же формулой при $E_\infty = E_0/1{,}50$ и $G_\infty = G_0/2{,}20$. Для $k\theta = 0$ и ∞ дополнительно использованы известные предельные опорные моменты. Во всех пяти вариантах жёсткости абсолютное расхождение мгновенного прогиба оказалось менее 10^{-12} м, асимптотического – менее 10^{-10} м. Это проверяет программную реализацию заданной модели, но не её соответствие конкретному материалу.

Таблица 3

Контрольные мгновенные решения при q = 12,60 кН/м

Закрепление концов	Опорный момент, кН·м	Изгибной прогиб, мм	Сдвиговой прогиб, мм	Суммарный прогиб, мм
Шарнирное	0,000	10,263	1,027	11,290
$k\theta$ = 15 МН·м/рад	12,377	2,795	1,027	3,822
Жёсткое	13,608	2,053	1,027	3,080

Полностью воспроизводимыми исходными данными являются таблицы 1–2, нулевая предыстория и уравнения (4)–(9). Для сравнения методов использована дополнительная сетка из 220 логарифмически распределённых значений времени от 0,1 до 18 250 суток. Расчёт выполнен самостоятельной матричной реализацией заданной модели; результаты воспроизводятся по указанным уравнениям без привязки к коммерческому программному комплексу.

6. Длительный прогиб и перераспределение опорного момента

Таблица 4

Наследственное решение для $k\theta$ = 15 МН·м/рад и q_s = 9,45 кН/м

t, сут	M, кН·м	w_b, мм	w_s, мм	w, мм	w_s/w, %
0	9,283	2,096	0,770	2,867	26,9
30	9,356	2,242	0,947	3,189	29,7
365	9,459	2,496	1,254	3,750	33,4
1 825	9,522	2,692	1,482	4,174	35,5
3 650	9,543	2,768	1,567	4,336	36,1
18 250	9,571	2,881	1,693	4,574	37,0

За рассматриваемый интервал полный прогиб от длительной нагрузки увеличивается приблизительно на 59,5 %, тогда как модуль опорного момента возрастает лишь на 3,1 %. Последнее изменение невелико по абсолютной величине, но принципиально важно методически: при расчёте соединения нельзя предполагать, что ползучесть всегда уменьшает момент или оставляет его неизменным.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.44

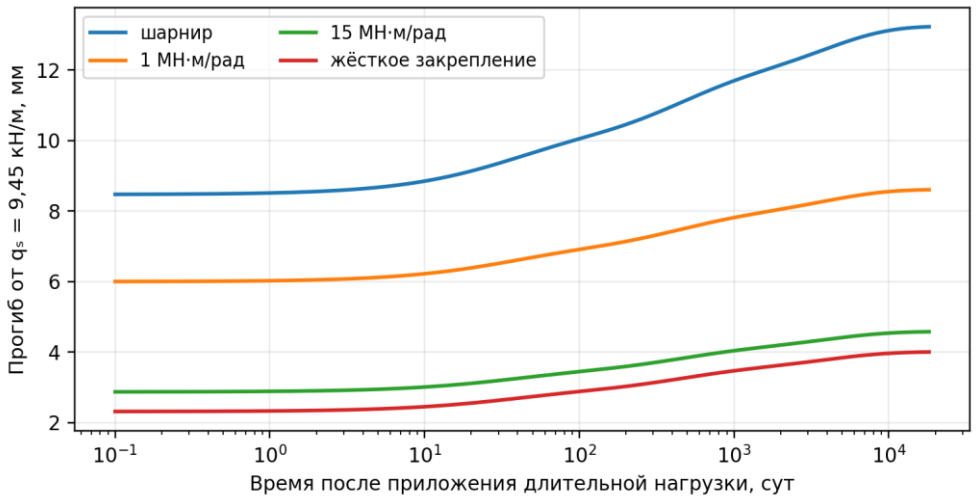


Рисунок 1. Расчётные прогибы от длительной нагрузки при различных вращательных закреплениях; коэффициенты ползучести заданы по таблице 2

Различие между изгибной и сдвиговой реологией меняет структуру деформации. При базовом закреплении сдвиговой прогиб увеличивается в 2,197 раза, а изгибной – приблизительно в 1,374 раза. Вторая величина меньше отношения податливостей материала из-за перераспределения опорного момента. Таким образом, изменение относительной доли сдвига отражает одновременно свойства материала и граничные условия.

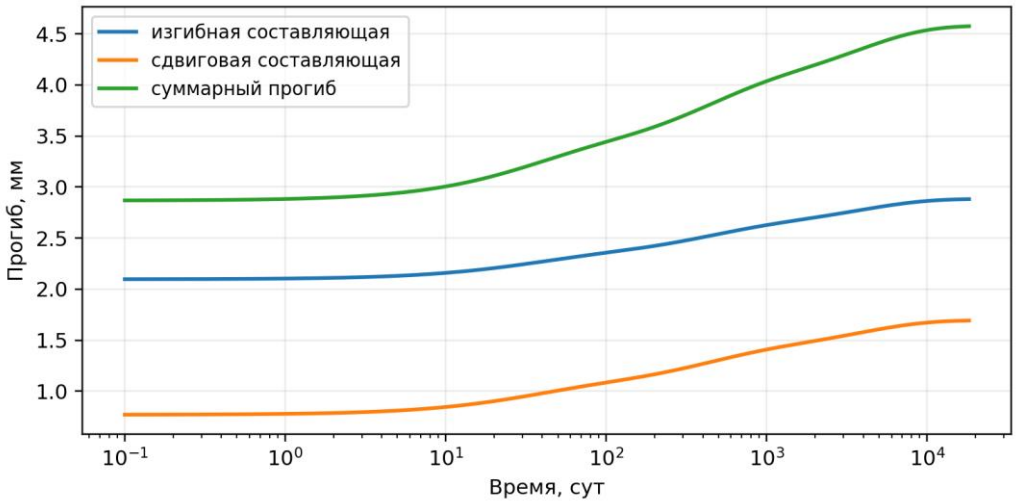


Рисунок 2. Изгибная и сдвиговая составляющие прогиба базовой балки; все кривые являются расчётными

Таблица 5

Влияние закрепления на отклик на горизонте 18 250 суток

kθ, МН·м/рад	**w(0) от q_s, мм**	**w(t) от q_s, мм**	**Доля сдвига, %**	**M(t), кН·м**	**w(t) + w_v(0), мм**
0	8,467	13,228	12,8	0,000	16,050
1	5,996	8,603	19,7	5,115	10,602
5	3,725	5,532	30,6	8,512	6,773
15	2,867	4,574	37,0	9,571	5,529
∞	2,310	4,000	42,3	10,206	4,769

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.44

Последний столбец является мгновенной огибающей при добавлении q_v = 3,15 кН/м к длительному состоянию. Он не учитывает ползучесть от самой дополнительной нагрузки при её продолжительном действии. Таблица также не является проверкой предельного прогиба по нормам: назначение здания и требования к отделке в исследовании не заданы.

7. Проверка распространённых упрощений и влияние истории нагрузки

7.1. Один множитель для полного прогиба

Для оценки распространённого упрощения принята формула $w_{sc}(t) = w(0)\big(1 + \varphi_E(t)\big)$, где φE = E₀JE − 1. Этот подход одновременно масштабирует изгиб и сдвиг по одной функции и сохраняет исходное соотношение балки и узлов. На горизонте 18 250 суток относительная ошибка по сравнению с наследственным решением составляет −4,07 % при шарнирных концах, +4,45 % при kθ = 1, +0,91 % при kθ = 5, −6,07 % при kθ = 15 и −13,45 % при жёстких концах.

Знак ошибки меняется. Поэтому нельзя заранее характеризовать единый коэффициент как консервативный. В частности, при жёстком закреплении он недооценивает ползучесть сдвига, а при достаточно податливом упругом узле может переоценивать прогиб, поскольку не отражает перераспределение момента к опорам. Эти числа относятся к выбранному спектру и не задают универсальную погрешность метода.

7.2. Метод эффективных модулей

Более содержательное упрощение состоит в повторном упругом расчёте с Eeff(t) = 1/JE(t), Geff(t) = 1/JG(t) и неизменным упругим kθ. В отличие от единого множителя этот расчёт меняет и долю сдвига, и относительное закрепление. На принятой сетке времени максимальное расхождение с наследственным решением составило 0,087 % для kθ = 1 МН·м/рад; при kθ = 15 оно не превысило 0,0063 %. Для шарнирного и жёсткого пределов при одной ступени нагрузки совпадение является точным в рамках модели.

Следовательно, для именно этой постоянной нагрузки, положительного ограниченного спектра и упругих пружин метод эффективных модулей является практически точным приближением. Для этой задачи усложнение алгоритма не даёт существенного выигрыша в точности по сравнению с методом эффективных модулей. Преимущество наследственного решения проявляется прежде всего в прозрачном учёте истории нагрузки, сохранении внутренних переменных и возможности последующего расширения модели соединения.

7.3. Приложение и снятие дополнительной нагрузки

Для проверки истории нагрузки к базовому длительному состоянию добавлена q_v на интервале от 3 650 до 3 657 суток. Благодаря линейности дополнительный отклик равен разности двух ступенчатых решений:

$$\Delta w_v(t) = q_v\big(h(t - t_1) - h(t - t_2)\big), \qquad t_1 = 3650, \quad t_2 = 3657. \qquad (10)$$

Здесь h – прогиб от единичной ступени нагрузки, равный нулю при отрицательном аргументе. Для kθ = 15 МН·м/рад дополнительный прогиб сразу после приложения составляет 0,956 мм, непосредственно перед снятием – 0,989 мм, сразу после снятия – 0,0337 мм. Через 30 суток после снятия остаётся 0,0149 мм, через 365 суток – 0,00185 мм. Это остаточное на данный момент вязкоупругое последействие, а не необратимая пластическая деформация: используемая модель предсказывает его постепенное исчезновение.

8. Деформационный зазор между стеной и ригелем

Для ненесущей стены принципиальна дата, в которую зафиксировано взаимное положение кромок. Если ограждение установлено при уже реализовавшемся прогибе балки, этот прогиб не должен повторно включаться в требуемый последующий ход. В частной

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.44

постановке с неподвижной нижней опорой стены и отсутствием дополнительной нагрузки в момент монтажа максимальное последующее сближение оценивается выражением

$$\Delta g(t, t_m) = w_{q_s}(t) - w_{q_s}(t_m) + w_{q_v}(0). \qquad (11)$$

При перемещающейся нижней опоре вместо прогиба одной балки используется относительное перемещение двух опорных уровней. При температурных изменениях, усадке стены, осадках основания и допусках монтажа в расчёт вводятся отдельные согласованные составляющие. Двойной учёт одного и того же перемещения недопустим. Геометрия трёхслойной стены и её независимость от несущей схемы каркаса соответствуют постановке исследования ограждения [11,12].

Таблица 6

Последующее сближение кромок до 18 250 суток при фиксации зазора на 30-е сутки

kθ, МН·м/рад	**Сближение по (11), мм**	**Интерпретация**
0	6,701	Наибольшее требование среди рассмотренных закреплений
1	4,091	Существенное влияние конечной жёсткости узла
5	2,703	Промежуточное решение
15	2,341	Базовый вариант
∞	2,142	Идеализированный нижний предел данного сравнения

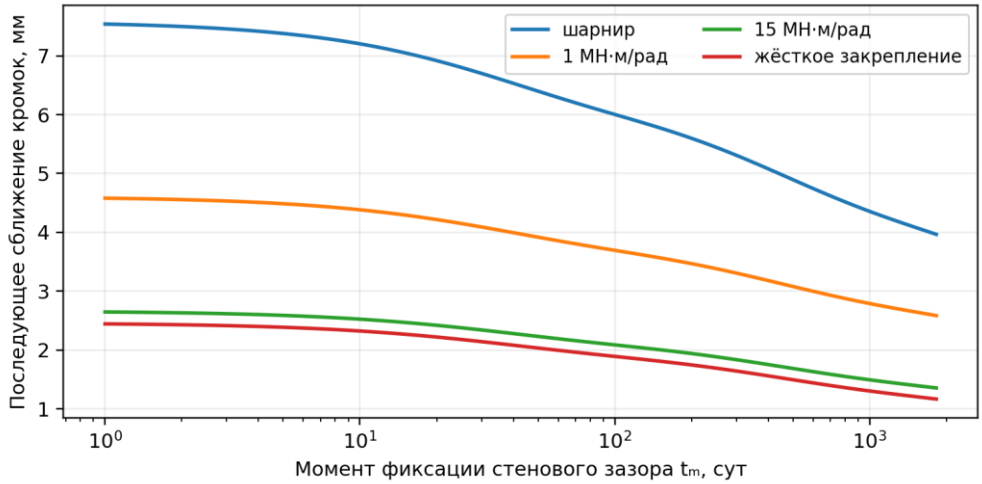


Рисунок 3. Влияние момента фиксации зазора на последующее сближение; нижняя опора стены принята неподвижной

Например, номинальный зазор 12 мм при условных резервах 3 мм на монтажные отклонения и 2 мм на температурное сближение оставляет 7 мм на рассматриваемое перемещение. Для базовой балки требование 2,341 мм меньше этого остатка. Однако данное сравнение подтверждает только один компонент кинематического баланса. Оно не доказывает достаточность узла в реальном здании, поскольку перемещение нижней опоры, усадка, состояние герметика, пожарное уплотнение и фактический свободный ход крепления здесь не измерялись.

9. Чувствительность и идентификация параметров

Для проверки влияния неопределённости коэффициенты a_i и b_i независимо умножались на 0,5; 1,0 и 1,5 при неизменных временах запаздывания. Это факторный численный эксперимент, а не доверительный интервал и не статистическая характеристика разброса серийных профилей.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.44

Таблица 7

Мгновенная огибающая прогиба на 18 250-е сутки, мм; kθ = 15 МН·м/рад

Множитель для a_i	**b_i × 0,5**	**b_i × 1,0**	**b_i × 1,5**
0,5	4,677	5,139	5,600
1,0	5,068	5,529	5,990
1,5	5,457	5,918	6,379

Наиболее неблагоприятный вариант таблицы превышает базовую огибающую на 15,4 %. Такая чувствительность показывает, почему определение только продольного модуля при растяжении недостаточно для расчёта длительного прогиба. При этом изменение жёсткости самого узла во времени может оказаться не менее существенным; оно не покрывается множителями таблицы 7.

Методики ISO 899-2:2024 и ASTM D2990-17(2025) относятся к определению ползучести пластмасс в установленных условиях испытания [7, 8]. Они не заменяют испытание полного профиля и соединения. ASTM отдельно указывает различия технического содержания с ISO 899, поэтому результаты, полученные по этим методам, не следует считать автоматически взаимозаменяемыми.

Для идентификации предлагаемой модели необходимы независимые измерения продольной и сдвиговой податливости, испытания балок как минимум с двумя отношениями L/h и контроль поворотов опор. Полноразмерный узел испытывается под длительным моментом с регистрацией поворота, проскальзывания и состояния отверстий. Температура, влажность, уровень напряжения, происхождение образца и разгрузочное последействие должны фиксироваться как часть набора данных. Число повторов и длительность серии устанавливаются программой испытаний; несуществующие серии и статистические показатели в статье не приводятся.

10. Обсуждение, ограничения и выводы

Методический результат работы – разделение трёх процессов: ползучести материала, изменения относительной жёсткости балки и соединения и накопления перемещения после установки стены. Такое разделение позволяет связать материальную реологию с конкретным эксплуатационным требованием, не приписывая ограждению несущую функцию и не используя один условный коэффициент для всех механизмов.

Прикладная проверка профиля должна дополнительно включать прочность, локальную и общую устойчивость, состояние опорных участков, длительную прочность и соединения. ASCE/SEI 74-23 с опубликованным Erratum 1 предоставляет нормативный контекст расчёта пултрузионных FRP-конструкций [5, 6], но настоящая рукопись не является полным расчётом по этому стандарту. Общие принципы надёжности требуют согласованного отношения к неопределённости воздействий, сопротивления и модели [11]. Никакой коэффициент ползучести из таблицы 2 не может использоваться вместо характеристик сертифицированного материала.

К ограничениям относятся линейность, симметричная нагрузка, постоянное сечение, неподвижные опоры и упругие нестареющие соединения. Не исследованы влияние температуры и влаги, неравномерная усадка перекрытия, изменение kθ(t), местное повреждение, ползучее разрушение и пространственная работа каркаса. Конечная асимптота модели – её заданное свойство, а не доказательство стабилизации реального профиля через определённое число лет.

Основные выводы. Для принятого эталона длительный прогиб при kθ = 15 МН·м/рад увеличивается с 2,867 до 4,574 мм, причём доля сдвига возрастает с 26,9 до 37,0 %. Опорный момент при этом повышается с 9,283 до 9,571 кН·м; следовательно, ползучесть нельзя учитывать только увеличением перемещений при неизменных усилиях.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.44

Единый множитель, основанный на изгибной ползучести, даёт ошибки обоих знаков: от завышения на 4,45 % до занижения на 13,45 % среди рассмотренных закреплений на конечном горизонте. Метод эффективных модулей при одной постоянной ступени и упругих пружинах оказался близок к наследственному решению – максимальное расхождение на исследованной сетке не превысило 0,087 %. Этот положительный результат относится только к заданному классу задач.

Требуемое последующее перемещение в стеновом зазоре определяется приращением после монтажа. При t_m = 30 суток оно составляет 2,341 мм для базового закрепления и 6,701 мм для шарнирного. Расчётный свободный ход должен проверяться относительно фактической нижней опоры стены и дополняться независимыми температурными, усадочными и монтажными составляющими.

Полученные зависимости являются завершённым аналитическим результатом для открыто заданных параметров. Экспериментальная квалификация конкретного профиля, узла и стенового примыкания остаётся самостоятельной задачей перед проектным применением; результаты таких испытаний в настоящей работе не заявляются.

Доступность данных и статус исследования

Исходные параметры, уравнения, граничные условия и контрольные результаты приведены в статье. Все численные результаты получены расчётным путём. Измерения реального здания, лабораторные протоколы, коэффициенты вариации и доверительные интервалы не использовались и не имитировались. Сведения о финансировании, конфликте интересов и вкладе авторов подтверждаются авторами при подготовке деклараций выбранного журнала.

Литература

1. Акбаров Д.Б., Акрамов Х.А. Напряжённо-деформированное состояние пултрузионного стеклопластикового каркаса малоэтажного 3D-печатного здания с учётом податливости узлов и сдвиговых деформаций. Неопубликованная расчётная рукопись, предоставленная авторами. 2026.

2. Sá M.F., Gomes A.M., Correia J.R., Silvestre N. Creep behavior of pultruded GFRP elements – Part 1: Literature review and experimental study. *Composite Structures*. 2011. Vol. 93. P. 2450–2459. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.04.013.

3. Sá M.F., Gomes A.M., Correia J.R., Silvestre N. Creep behavior of pultruded GFRP elements – Part 2: Analytical study. *Composite Structures*. 2011. Vol. 93. P. 2409–2418. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.04.001.

4. Qiao P., Barbero E.J., Davalos J.F. On the Linear Viscoelasticity of Thin-Walled Laminated Composite Beams. *Journal of Composite Materials*. 2000. Vol. 34, No. 1. P. 39–68. DOI: 10.1177/002199830003400103.

5. ASCE/SEI 74-23. *Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures*. Reston: ASCE, 2023. DOI: 10.1061/9780784415771.

6. ASCE/SEI 74-23. *Erratum 1*. Effective January 13, 2026. Официальное исправление к стандарту. DOI: 10.1061/9780784415771.err.

7. ISO 899-2:2024. *Plastics – Determination of creep behaviour – Part 2: Flexural creep by three-point loading*. Geneva: ISO, 2024.

8. ASTM D2990-17(2025). *Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics*. ASTM International. DOI: 10.1520/D2990-17R25.

9. Qureshi J., Mottram J.T. Moment-rotation response of nominally pinned beam-to-column joints for frames of pultruded fibre reinforced polymer. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 77. P. 396–403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.057.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.44

10. Ferrara G., Helson O., Michel L., Ferrier E. Mechanical Characterisation of GFRP Frame and Beam-to-Column Joints Including Steel Plate Fastened Connections. *Materials*. 2022. Vol. 15. Art. 8282. DOI: 10.3390/ma15238282.

11. ISO 2394:2015. *General principles on reliability for structures*. Geneva: ISO, 2015.

12. Акбаров Д.Б., Акрамов Х.А. Прочностные, теплофизические и эксплуатационные характеристики трёхслойной 3D-печатной стены с полистиролбетонным заполнением. Неопубликованная расчётная рукопись, предоставленная авторами. 2026.