

УДК 624.073.113

**Каюмов Р.А.** – доктор физико-математических наук, профессор

E-mail: kayumov@gambler.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Ахметшин М.М.** – инженер

E-mail: marat717@gmail.com

**ЗАО «Казанский ГипроНИИАвиапром»**

Адрес организации: 420127, Россия, г. Казань, ул. Дементьева, д. 1

### Долговечность панели с внешним каркасом из тонкостенных гнутых профилей с учетом ползучести утеплителя

#### Аннотация

Рассматривается новый тип панелей, в которых элементы каркаса выполнены из тонкостенных гнутых С-образных профилей с полками, втопленными с внешней и внутренней стороны в слой утеплителя. Подобные панели известны в нашей стране как система «Радослав» и используются в качестве несущих конструкций стен легких зданий. Приводится методика расчета долговечности этих панелей при работе на сжатие при различных значениях нагрузок и зависимость долговечности панели от нагрузки.

**Ключевые слова:** панель, тонкостенные профили, утеплитель, напряжения, ползучесть, старение, долговечность.

В настоящее время при строительстве легких зданий, а именно устройстве их стен, используются облегченные панели типа «сэндвич», включающие стальные обшивки и внутренний слой из эффективного утеплителя (пенополистирол, минеральная вата и др.).

Недостаток этих панелей состоит в большом расходе стали на обшивки и низкой прочности на сжатие.

Предлагаемая новая конструкция стеновых панелей с внешним каркасом из тонкостенных профилей позволяет эффективно решить указанную задачу.

В данной статье исследуется долговечность нового типа панелей, в которых каркас из стальных тонкостенных С-образных элементов с полками, втопленными в слой утеплителя из пенополистирола, установленных с некоторым шагом с внешней и внутренней стороны панели образуют единую несущую и ограждающую конструкцию (рис. 1). Подобные панели известны в нашей стране как система «Радослав» [1] и используются в качестве несущих конструкций стен легких зданий.

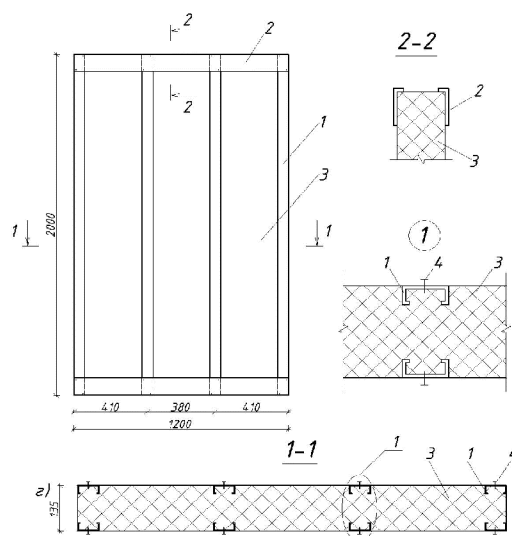


Рис. 1. Конструктивная схема панели:

1 – тонкостенный стальной профиль; 2 – обвязка торцевого элемента из уголка 100x20x0,7 мм;

3 – пенополистирол толщиной 135 мм; 4 – самосверляющий винт Ø4

В лаборатории кафедры металлических конструкций и испытания сооружений при КГАСУ проведены теоретические и экспериментальные исследования, которые подтвердили техническую и экономическую целесообразность их применения [2, 3].

Для практической реализации рассматриваемой панели необходимо провести исследование ее долговечности.

Для определения долговечности используем апробированный метод [4-8].

Пусть площадь и модуль упругости внешнего каркаса и утеплителя связаны между собой соотношением:

$$\left. \begin{aligned} A^{ym} &= m_A \cdot A^{kap} \\ E^{kap} &= m_E \cdot E^{ym} \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Примем, что каркас чисто упругий элемент, а утеплитель ползет по закону:

$$\frac{d\varepsilon_{cr}^{ym}}{dt} = \frac{\sigma^{ym}}{\eta^{ym}}. \quad (2)$$

Упругая часть деформации определяется по закону Гука:

$$\varepsilon_{yup}^{ym} = \frac{\sigma^{ym}}{E^{ym}}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{yup}^{kap} = \frac{\sigma^{kap}}{E^{kap}}. \quad (4)$$

Найдем сначала напряжения в утеплителе  $\sigma^{ym}$  и в каркасе  $\sigma^{kap}$ , а затем из условия устойчивости каркаса определим время, до которого оно будет выполняться.

Поскольку ползучесть происходит во времени, то напряжения и деформации тоже являются функциями времени  $t$ :

$$\sigma^{ym} = \sigma^{ym}(t), \sigma^{kap} = \sigma^{kap}(t), \varepsilon_{cr}^{ym} = \varepsilon_{cr}^{ym}(t), \varepsilon_{yup}^{ym} = \varepsilon_{yup}^{ym}(t).$$

Часть силы  $F$  распределяется на утеплитель, часть на каркас:

$$N^{ym} + N^{kap} = F. \quad (5)$$

Решений бесконечное множество, для выбора из них соответствующего задаче нужно привлекать дополнительное условие, а именно:

$$\varepsilon^{kap} = \varepsilon^{ym}. \quad (6)$$

В (6) подставим нижеследующие соотношения:

$$\varepsilon^{ym} = \varepsilon_{yup}^{ym} + \varepsilon_{cr}^{ym} = \frac{\sigma^{ym}}{E^{ym}} + \varepsilon_{cr}^{ym}, \quad \varepsilon^{kap} = \frac{\sigma^{kap}}{E^{kap}}.$$

Продифференцируем условие совместности (6) по времени

$$\frac{1}{E^{kap}} \cdot \frac{d\sigma^{kap}}{dt} = \frac{1}{E^{ym}} \cdot \frac{d\sigma^{ym}}{dt} + \frac{\sigma^{ym}}{\eta^{ym}}. \quad (7)$$

Исключим отсюда  $\sigma^{kap}$ . Для этого будем использовать связь усилий и напряжений:

$$N^{ym} = \sigma^{ym} \cdot A^{ym} = \sigma^{ym} \cdot m_A \cdot A^{kap}, \quad N^{kap} = \sigma^{kap} \cdot A^{kap}, \quad m_A = A^{ym} / A^{kap}.$$

Тогда из (5) вытекает, что:

$$\sigma^{ym} \cdot m_A \cdot A^{kap} + \sigma^{kap} \cdot A^{kap} = F.$$

Деля на площадь каркаса, получим:

$$\sigma^{ym} \cdot m_A + \sigma^{kap} = \frac{F}{A^{kap}}. \quad (8)$$

Продифференцируем это соотношение по  $t$ :

$$\frac{d\sigma^{kap}}{dt} = -m_A \cdot \frac{d\sigma^{ym}}{dt}.$$

Теперь подставим  $\frac{d\sigma^{kap}}{dt}$  в (7):

$$\frac{-m_A}{E^{kap}} \cdot \frac{d\sigma^{ym}}{dt} = \frac{1}{E^{ym}} \cdot \frac{d\sigma^{ym}}{dt} + \frac{\sigma^{ym}}{\eta^{ym}}, \quad \frac{d\sigma^{ym}}{dt} \left( \frac{m_A}{E^{kap}} + \frac{1}{E^{ym}} \right) + \frac{\sigma^{ym}}{\eta^{ym}} = 0.$$

Предположим, что утеплитель стареет. Введем параметр старения:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{B \cdot \sigma(t)}{1 - \omega}, \quad (9)$$

где  $B$  – экспериментальная характеристика:

$$-d\omega \cdot (\omega - 1) = B \cdot |\sigma^{ym}(t)| dt, \quad -\frac{(\omega - 1)^2}{2} = B \cdot \int_0^t |\sigma^{ym}(t)| dt + c.$$

Константу  $c$  находим из начального условия при  $t=0$ :

$$\omega(0) = 0 \Rightarrow c = -\frac{1}{2},$$

$$\omega = 1 - \sqrt{-2 \cdot B \cdot \int_0^t |\sigma^{ym}(t)| dt + 1}. \quad (10)$$

Примем, что при старении утеплителя падает  $E$  по закону:

$$E^{ym} = E_{нач}^{ym} \cdot (1 - \omega). \quad (11)$$

Условие совместности примет вид:

$$\frac{-m_A}{E^{kap}} d\sigma^{ym} = \frac{d\sigma^{ym}}{E_{нач}^{ym} \cdot (1 - \omega)} + \frac{\sigma^{ym} dt}{\eta}.$$

Решаем это уравнение методом конечных разностей по времени:

$$\begin{aligned} d\sigma^{ym} &\approx \Delta\sigma^{ym} = \sigma_k - \sigma_{k-1}, \\ -\frac{m_A}{E^{kap}} (\sigma_k^{ym} - \sigma_{k-1}^{ym}) &= \frac{\sigma_k^{ym} - \sigma_{k-1}^{ym}}{E^{ym}} + \frac{\sigma_k^{ym} \cdot \Delta t}{\eta}, \\ -\frac{m_A}{E^{kap}} \cdot \sigma_k^{ym} + \frac{m}{E^{kap}} \cdot \sigma_{k-1}^{ym} &= \frac{\sigma_k^{ym}}{E^{ym}} - \frac{\sigma_{k-1}^{ym}}{E^{ym}} + \frac{\sigma_k^{ym} \cdot \Delta t}{\eta}, \\ \frac{\sigma_k^{ym}}{E^{ym}} + \frac{\sigma_k^{ym} \cdot \Delta t}{\eta} + \frac{m}{E^{kap}} \cdot \sigma_k^{ym} &= \frac{m_A}{E^{kap}} \cdot \sigma_{k-1}^{ym} + \frac{\sigma_{k-1}^{ym}}{E^{ym}}, \\ \sigma_k^{ym} \cdot \left( \frac{1}{E^{ym}} + \frac{\Delta t}{\eta} + \frac{m_A}{E^{kap}} \right) &= \sigma_{k-1}^{ym} \cdot \left( \frac{m_A}{E^{kap}} + \frac{1}{E^{ym}} \right), \\ \sigma_k^{ym} = \sigma_{k-1}^{ym} \cdot \left( \frac{m_A}{E^{kap}} + \frac{1}{E^{ym}} \right) / \left( \frac{1}{E^{ym}} + \frac{\Delta t}{\eta} + \frac{m_A}{E^{kap}} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Напряжения в каркасе определяются по формуле:

$$\sigma^{kap} = \frac{F}{A^{kap}} - \sigma^{ym} \cdot m_A. \quad (13)$$

Для определения  $\sigma^{ym}$  и  $\sigma^{kap}$  в начальный момент времени решаем упругую задачу. При  $t=0$  можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0^{kap} &= \frac{F}{A^{kap}} - \sigma_0^{ym} \cdot m_A \\ \sigma_0^{ym} &= \frac{F}{A^{kap}} \cdot \frac{1}{(m_A + E^{kap} / E_0^{ym})} \end{aligned} \right\},$$

$$\varepsilon_{cr}^{ym} = 0,$$

$$N^{ym} = \frac{m_A}{(m_A + m_E)} \cdot F,$$

$$\sigma^{ym} = \frac{m_A}{(m_A + m_E)} \cdot \frac{F}{A^{ym}}.$$

Тогда:

$$\int_0^t \sigma^{ym}(t) dt = \sigma_0^{ym} \cdot \Delta t + \sigma_1^{ym} \cdot \Delta t + \dots + \sigma_k^{ym} \cdot \Delta t. \quad (14)$$

После каждого шага проверяем устойчивость каркаса по формуле:

$$\sigma^{kap} \approx \frac{F}{A^{kap}} \leq \sigma^{kp} = \frac{2 \cdot \sqrt{E^{kap} \cdot I_{\min}^{kap} \cdot k^{ym}}}{A_1^{kap}}, \quad (15)$$

$$A^{kap} = A_1^{kap} \cdot n,$$

где  $n$  – количество элементов каркаса ( $n=8$  шт.).

$$k^{ym} = E^{ym} \cdot c = E_{нач}^{ym} \cdot (1 - \omega) \cdot c. \quad (16)$$

Параметр  $c$  в формуле (16) определяем из формулы (15) при разрушающей нагрузке  $F=F^*=3400$  кг и  $t=0$ :

$$c = \frac{F_*^2}{4 \cdot n^2 \cdot E_{кар} \cdot I_{мин}^{кар} \cdot E_{нач}^{ym}},$$

$$c = \frac{3400^2}{4 \cdot 8^2 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,772 \cdot 70} = 3,979 \cdot 10^{-4}.$$

Все вычисления проведем с помощью программы «Wolfram Mathematica 8», принимая следующие данные  $\Delta t = 30$ ,  $\eta = 78900$ ,  $B = 0,005$ ,  $E_{нач}^{ym} = 70 \text{ кг} / \text{см}^2$ ,  $k_0^{ym} = 0,028$ ,  $I_{мин}^{кар} = 0,772 \text{ см}^4$ .

Результаты полученных вычислений представлены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Нагрузка F, кг	Долговечность t, сут.
1	3250	128,75
2	3300	55
3	3350	26,25
4	3400	7,5

По результатам проведенных вычислений составим зависимость (рис. 2).

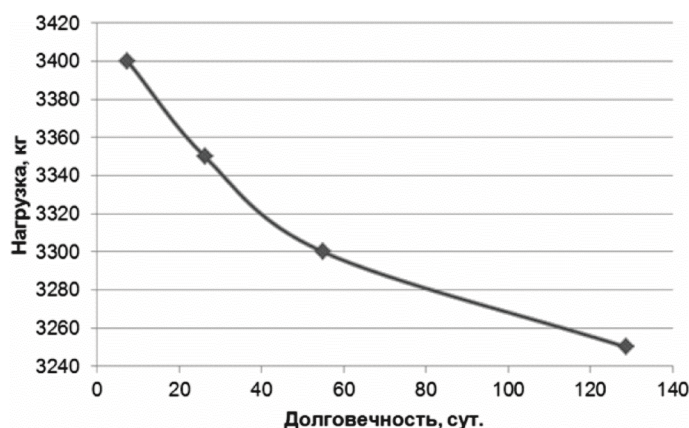


Рис. 2. Зависимость F(t)

Для получения линейной зависимости, результаты проведенных вычислений, представленные в табл. 1, заменим их натуральными логарифмами (табл. 2) и построим зависимость (рис. 3).

Таблица 2

№ п/п	Нагрузка LnF, кг	Долговечность Lnt, сут.
1	8,08641	4,85787
2	8,10168	4,00733
3	8,11672	3,26767
4	8,13153	2,01490

Аппроксимируя данную зависимость линейной функцией получим соотношение вида  $\text{Ln}F = -0,016\text{Ln}t + 8,2165$ .

Таким образом, полученная зависимость позволяет прогнозировать долговечность панели в зависимости от нагрузки.

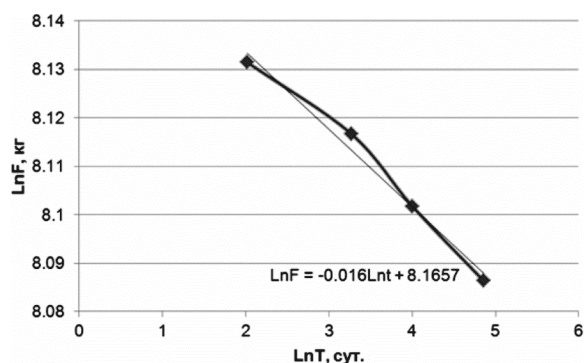


Рис. 3. Зависимость LnF(LnT)

### Список библиографических ссылок

1. Альбом технических решений конструкций на основе термоструктурных панелей из пенополистирола системы СП «Радослав» в сочетании с различными материалами обеспечивающими их огнезащиту (для гражданского строительства). – М.: АО «Инрекон», СП «Радослав», ЦНИИСК им. Кучеренко, 1997. – 32 с.
2. Кузнецов И.Л., Ахметшин М.М. Исследование действительной работы облегченных панелей с каркасом из тонкостенных профилей // Известия КазГАСУ, 2009, № 2 (12) – С. 118-121.
3. Ахметшин М.М. Исследование действительной работы фрагментов панелей с внешним каркасом из тонкостенных профилей при работе на изгиб // Сборник научных трудов КГАСУ. – Казань: Изд-во КГАСУ, 2010. – С. 17-19.
4. Каюмов Р.А., Мангушева А.Р., Мухаметшин А.Т., Сулейманов А.М. К определению долговечности пленочно-тканевого композиционного материала, подвергаемого воздействию солнечной радиации // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки, 2010, т. 152, № 4. – С. 158-165.
5. Смирнов Д.С., Рахимов Р.З., Габидуллин М.Г., Каюмов Р.А., Стоянов О.В. Испытания и прогнозная оценка долговечности уплотнительной резины герметизирующих стыков блоков отделки метро // Вестник Казанского технологического университета, 2014, т. 17, № 15. – С. 141-146.
6. Каюмов Р.А., Гатиятуллин А.Э., Шабанов А.М. Расчет долговечности балки при ползучести с учетом упрочнения // Известия КГАСУ, 2014, № 4 (30). – С. 326-330.
7. Каюмов Р.А., Мангушева А.Р. Оценка длительной прочности пленочно-тканевого композиционного материала с учетом изменения температурного поля в течении года // Материалы XX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – М., 2014. – С. 96-97.
8. Каюмов Р.А., Мухамедова И.З. Разработка методики оценки долговечности пленочно-тканевых материалов с учетом влияния силовых факторов и солнечной радиации // Материалы XX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – М., 2014. – С. 97-98.

**Kayumov R.A.** – doctor of physical and mathematical sciences, professor

E-mail: kayumov@rambler.ru

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Ahmetshin M.M.** – engineer

E-mail: marat717@gmail.com

**CJSC «Kazan Giproniaviaprom»**

The organization address: 420127, Russia, Kazan, Dementieva st., 1

## The durability of the panel with an external frame of thin-walled cold-formed sections taking into account creep insulation

### Resume

At present, the construction of light buildings, namely the device of walls, used lightweight panel «sandwich» including steel casing and an inner layer of effective insulation (polystyrene, mineral wool, and others.).

The disadvantage of these boards is to a large flow rate steel cladding and low compressive strength.

The proposed new design of wall panels with an external frame of thin-walled sections can effectively solve this problem.

This article explores the durability of a new type of panel in which the skeleton of steel thin-walled C-shaped elements with shelves, immersed in a layer of polystyrene insulation installed with some step from the outside and the inside of the panel to form a single bearing and protecting designs. Such panels are known in our country as a system of «Radoslaw» and used as load-bearing structures of buildings the walls of the lungs.

In the laboratory of the department of metal structures and test facilities at KSUAE conducted theoretical and experimental studies, which confirmed the technical and economic feasibility of their application.

The technique of calculating the durability of the panels when the compressive load for different values of longevity and dependence on the load panel.

**Keywords:** panel, thin-walled profiles, insulation, voltage, creep, aging, longevity.

### Reference list

1. Album of technical solutions on the basis of thermo-structural panels of expanded polystyrene of JV «Radoslaw» in combination with different materials provide fire protection on their (civil engineering). – M.: JSC «INREKON», JV «Radoslaw», CNIISK Kucherenko, 1997. – 32 p.
2. Kuznetsov I.L., Akhmetshin M.M. Research work real lightweight panels with a frame made of thin-walled profiles // *Izvestiya KGASU*, 2009, № 2 (12). – P. 118-121.
3. Akhmetshin M.M. Studies do work fragments of panels with external frame made of thin-walled profiles at work bending // *Sbornik nauchnykh trudov KGASU*. – Kazan: Publishing KGASU, 2010. – P. 17-19.
4. Kayumov R.A., Mangusheva A.R., Mukhametshin A.T., Suleymanov A.M. Determination of durability of the composite film-fabric material to be exposed to solar radiation // *Uchenyye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskiiye nauki*, 2010, vol. 152, № 4. – P. 158-165.
5. Smirnov D.S., Rakhimov R.Z., Gabidullin M.G., Kayumov R.A., Stoyanov O.V. Tests and prognostic evaluation of durability of the sealing rubber sealing joints blocks lining the metro // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, № 15. – P. 141-146.
6. Kayumov R.A., Gatiyatullin A.E., Shabanov A.M. Durability beams when considering creep hardening // *Izvestiya KGASU*, 2014, № 4 (30). – P. 326-330.
7. Kayumov R.A., Mangusheva A.R. Evaluation of long-term strength film-fabric composite material based on the temperature field within the year // *Proceedings of the XX International Symposium «Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continua» named A.G. Gorshkov, Moscow Aviation Institute (National Research University)*. – M., 2014. – P. 96-97.
8. Kayumov R.A., Mukhamedova I.Z. Development of methodology for assessing the durability of film-fabric materials with the influence of power factors and solar radiation // *Proceedings of the XX International Symposium «Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continua» named A.G. Gorshkov, Moscow Aviation Institute (National Research University)*. – M., 2014. – P. 97-98.