

№3 (8)
2022

Инженерные --- ИССЛЕДОВАНИЯ

ISSN 2782-5582

СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ СТАРЕЮЩЕГО БЕТОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ ТВЕРДЕНИЯ Д.М. Кабанов	3-10
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ С-44-1.5 ММ, С-21-1.5 ММ, СИМС-D02-01А 1.6 В.Т. Бондарь	11-19
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ «ЗЕЛЕНАЯ КРОВЛЯ» В.М. Саматова, О.С. Гамаюнова	20-29
КОНЦЕПЦИЯ МОДУЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ПРИМЕРЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С.В. Шевцов, Н.С. Астафьева	30-37
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ Г.А. Титов	38-49

CONTENTS

AGING CONCRETE CREEP DETERMINATION UNDER VARIOUS TEMPERATURE CONDITIONS OF HARDENING D.M. Kabanov	3-10
COMPARATIVE ANALYSIS OF STRESS-DEFORMED STATE OF PROFILED SHEETS C-44-1.5 MM, C-21-1.5 MM, CIMC-D02-01A 1.6 V.T. Bondar	11-19
ENERGY EFFICIENCY OF PUBLIC BUILDINGS USING GREEN ROOF TECHNOLOGY V.M. Samatova, O.S. Gamayunova	20-29
THE CONCEPT OF MODULAR CONSTRUCTION ON THE EXAMPLE OF THE USE OF LIGHT METAL STRUCTURES S.V. Shevtsov, N.S. Astafeva	30-37
MATERIALS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION G.A. Titov	38-49

УДК 69.04

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ СТАРЕЮЩЕГО БЕТОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ ТВЕРДЕНИЯ

Д.М. Кабанов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В настоящей статье приводится методика построения семейства кривых меры ползучести стареющего бетона в зависимости от различных температурных условий окружающей среды. Рассмотрены ситуации твердения бетона при постоянных, но различных по своему значению температурах в диапазоне от 20 до 50 градусов Цельсия, и при переменных, ступенчато повышающихся и понижающихся температурах в диапазоне от 9 до 50 градусов Цельсия. Показано, что в молодом бетоне влияние температуры на затвердевание смеси значительно превосходит ее влияние, оказываемое на вязкость геля цементного камня, что способствует занижению ползучести при повышенной температуре. Описан вариант решения проблемы получения заниженных значений деформаций ползучести при ступенчатом повышении температуры, основанный на использовании гипотезы приведенного времени. Проведенные исследования подтвердили факт отсутствия эффекта температурного последствия при определении ползучести бетона в условиях переменных, ступенчато понижающихся температур. На примере бетона, загруженного в возрасте 4 суток, была проанализирована важность учета температурных условий старения бетона, в частности, ступенчатый характер изменения температуры, приводящий к значительному увеличению ползучести бетона при ее повышении.

Ключевые слова: строительство, строительные конструкции, бетон, ползучесть бетона, мера ползучести, кривые ползучести, гипотеза приведенного времени, эффект температурного последствия, температура, влияние температуры.

Ссылка для цитирования: Кабанов Д.М. Определение ползучести стареющего бетона при различных температурных режимах твердения // Инженерные исследования. 2022. №3 (8). С. 3-10. EDN: DABKXW

AGING CONCRETE CREEP DETERMINATION UNDER VARIOUS TEMPERATURE CONDITIONS OF HARDENING

D.M. Kabanov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. This article presents a method for constructing a family of creep curves of aging concrete depending on various ambient temperature conditions. Concrete hardening situations are considered at constant but different temperatures in the range from 20 to 50 degrees Celsius, and at variable, stepwise rising and falling temperatures in the range from 9 to 50 degrees Celsius. It is shown that in young concrete, the effect of temperature on the solidification of the mixture significantly exceeds its effect on the viscosity of the cement stone gel, which contributes to an underestimation of creep at elevated temperatures. A solution to the problem of obtaining underestimated values of creep deformations with a stepwise increase in temperature is described, based on the use of the reduced time hypothesis. The conducted studies have confirmed the fact that there is no effect of temperature aftereffect in determining the creep of concrete under variable.

Keywords: construction, building structures, concrete, concrete creep, creep measure, creep curves, reduced time hypothesis, effect of temperature aftereffect, temperature, temperature effect.

For citation: Kabanov D.M. Aging concrete creep determination under various temperature conditions of hardening // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.3 (8). Pp. 3-10. EDN: DABKXW

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассматриваются основные положения методики построения кривых мер ползучести стареющего бетона при различных способах учета температуры окружающей среды, основанной на экспериментальных данных П.И. Васильева, Б.А. Гаврилина и А.В. Малькевича [1–3]. Описанная методика позволяет получать семейства кривых, отражающих меру ползучести бетона в зависимости от рассматриваемого временного промежутка как при изотермическом температурном процессе, так и при повышении или понижении температуры за счет выделения участков постоянства действующих температур.

Определение термонапряженного состояния системы с учетом ползучести бетона в рамках линейной теории наследственного старения Маслова-Арутюняна принято осуществлять при помощи методики, основанной на использовании функции релаксации [4], либо с помощью итерационного метода начальных приращений или «ступенек», позволяющий, при желании, рассмотреть ползучесть бетона как нелинейную функцию времени, разбивая необходимый временной промежуток на расчетные интервалы. В работе Д.А. Страхова [5] доказано, что устойчивость системы при использовании метода «ступенек» значительно зависит от степени нелинейности деформаций ползучести, возможности их обратимости и характера разбиения на временные интервалы рассматриваемого отрезка старения бетонной конструкции.

Вопрос учета температурных воздействий на различные строительные конструкции также подробно рассмотрен в работах таких авторов, как Семенов К.В., Корсун В.И., Барабанщиков Ю.Г., Рыбаков В.А. и др. [6–11].

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ МЕР ПОЛЗУЧЕСТИ СТАРЕЮЩЕГО БЕТОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Для бетонных конструкций определяющее значение имеет температура, при которой протекает ползучесть. В зависимости от температурных условий, в которых «стареет» свежесушенный бетон, будет значительно изменяться скорость его гидратации, отчего, в свою очередь, будет зависеть скорость снижения его деформативности. Экспериментально доказано, что ползучесть при повышающихся температурах будет значительно больше, чем в условиях одинаковых средних температур окружающей среды.

Рассмотрим методику построения кривых мер ползучести бетона при действии произвольных, но постоянных по времени температур, согласно гипотезе приведенного времени. В таком случае, мера ползучести будет описываться зависимостью вида (1):

$$c(t, \tau, T) = \int_{\tau}^t \varphi(t_{\text{прив}}) \cdot \Delta f(t - \tau) \cdot K(T) \cdot dt, \quad (1)$$

где $\varphi(t_{\text{прив}})$ - функция влияния возраста бетона на скорость нарастания удельных деформаций ползучести;

$\Delta f(t - \tau)$ - приращение монотонно убывающей функции длительности приложения нагрузки, пропорциональной скорости нарастания деформаций ползучести стареющего бетона;

$K(T)$ - функция влияния температуры на вязкость геля цементного камня и связанной воды.

Согласно опубликованным научным результатам, функцию влияния возраста стареющего бетона на скорость нарастания удельных деформаций ползучести с достаточной точностью описывает эмпирическая зависимость (2):

$$\varphi(t_{\text{прив}}) = A + \frac{B}{C + \gamma \cdot t}, \quad (2)$$

где A, B, C, γ - эмпирические коэффициенты, принимаемые равными: $A = 0,85; B = 30; C = 5; \gamma = 1,1$; t - момент времени в координатах приведенного времени.

Монотонно убывающая функция длительности приложения нагрузки, в свою очередь, представляет собой экспоненциальную зависимость вида (3):

$$\Delta f(t - \tau) = C_0 \cdot [1 - \beta \cdot e^{-0,06 \cdot (t - \tau)}], \quad (3)$$

где C_0, β - эмпирические коэффициенты, принимаемые равными при $t - \tau \geq 1$: $C_0 = 1,55 \cdot 10^{-6}; \beta = 0,85$ и при $t - \tau < 1$: $C_0 = 5,21 \cdot 10^{-6}; \beta = 1$;

t - рассматриваемый момент времени;

τ - время загрузки конструкции.

Функция влияния температуры на вязкость геля цементного камня и связанной воды, в общем случае, носит нелинейный характер, проявляющийся на достаточно широких диапазонах температур. При рассмотрении исследуемых температур в рамках данной статьи, функцию $K(T)$ можно представить линейной зависимостью (4):

$$K(T) = \frac{40 + T}{60}, \quad (4)$$

где T - температура на рассматриваемом временном промежутке.

Для заданных температур в 20, 30, 40 и 50°C, функция $K(T)$ будет иметь следующие значения: $K(20^\circ) = 1$; $K(30^\circ) = 1,17$; $K(40^\circ) = 1,34$; $K(50^\circ) = 1,51$.

Гипотеза приведенного времени, предложенная П.И. Васильевым, позволяет учесть температурную предысторию твердения образца при помощи замены действительного момента времени приведенным согласно зависимости (5):

$$t_{прив} = \int_{\tau_0}^t F(T) \cdot d\tau, \quad (5)$$

где τ_0 - момент начала твердения конструкции;

$F(T)$ - функция, учитывающая ускорение старения бетона с повышением температуры.

Обработка экспериментальных кривых ползучести показала, что отношение промежутков времени, необходимых для определения значения функции старения бетона при различных, но постоянных во времени температурах, есть величина практически постоянная, что позволяет учитывать гипотезу приведенного времени для данного случая путем умножения действительного момента времени t на некоторое усредненное значение функции старения бетона $F(T)$ для рассматриваемой температуры, т.е. (6):

$$t_{прив} = t \cdot F(T), \quad (6)$$

Б.А. Гаврилин [2] были выведены значения данной функции для рассматриваемых температур, а именно: $F(20^\circ) = 1$; $F(30^\circ) = 1,2$; $F(40^\circ) = 1,84$; $F(50^\circ) = 3,5$.

Для верификации описанной методики с опубликованными результатами экспериментов, рассмотрим семейство кривых мер ползучести бетона, стареющего в условиях постоянных, но различных по величине температур в 20, 30, 40 и 50°C, приняв для построения момент загрузки конструкции, равный $\tau = 7$ сут и отсчитываемый с момента начала твердения бетона. Результаты построения кривых мер ползучести бетона, загруженного в возрасте $\tau = 7$ сут, при действии постоянных, но различных по величине температур в 20, 30, 40 и 50°C на временном промежутке в 120 сут, приведены на рис. 1.

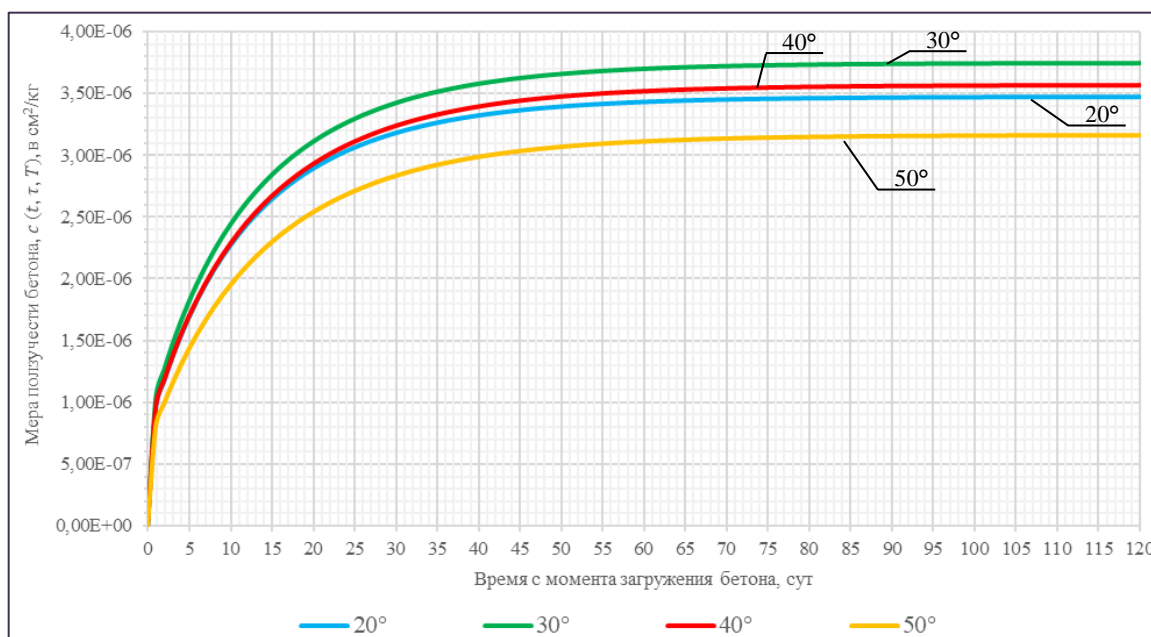


Рис. 1. Кривые мер ползучести бетона, загруженного в возрасте $\tau = 7$ сут, при действии постоянных, но различных по величине температур в 20, 30, 40 и 50°C

Fig. 1. The curves of the creep measures of concrete loaded at the age of $\tau = 7$ days, under the action of constant but varying temperatures in 20, 30, 40 and 50 °C

Как видно из рис. 1, ползучесть бетона при повышенной температуре в 50°C действительно оказалась меньше, чем ползучесть бетона при температуре в 20°C, как это и было показано в научных работах. Объясняется это тем, что в молодом бетоне влияние температуры на затвердевание смеси значительно превосходит ее влияние, оказываемое на вязкость геля цементного камня, что и занижает ползучесть при достаточно повышенной температуре. Тем не менее, доказано, что при повышении возраста бетона, например, при загрузении в возрасте 135 сут, будет наблюдаться противоположная ситуация из-за влияния температуры на вязкость геля цементного камня, вследствие чего ползучесть конструкции при повышенных температурах будет превосходить значения, полученные при температуре в 20°C и ниже, что также подтверждается на рис. 2.

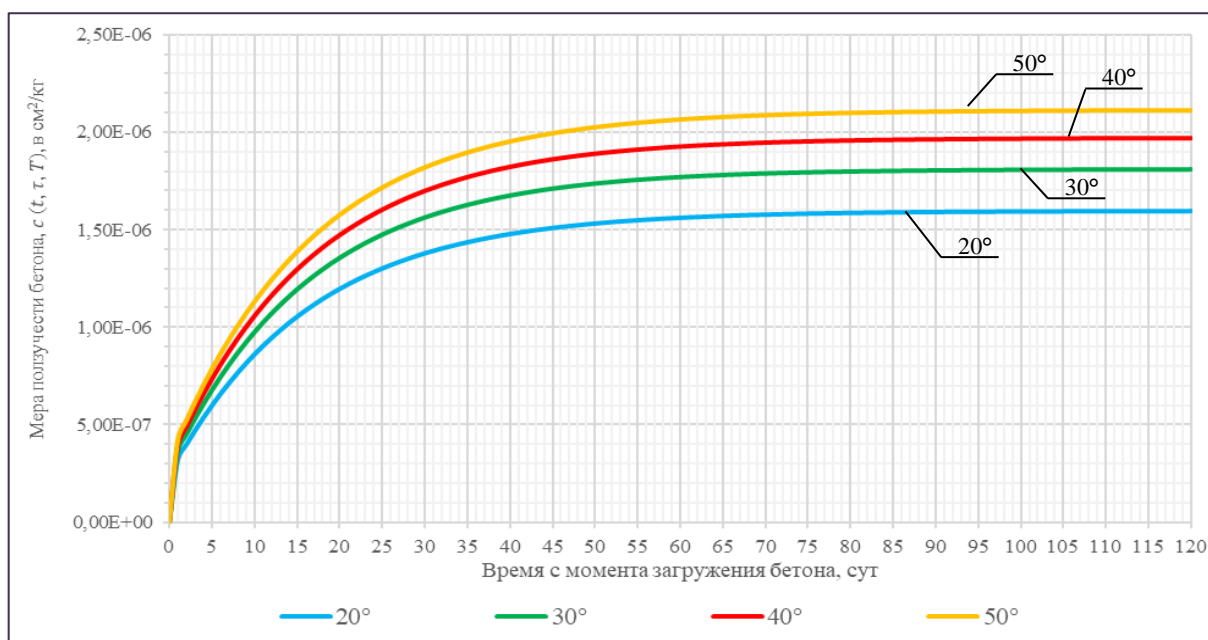


Рис. 2. Кривые мер ползучести бетона, загруженного в возрасте $\tau = 135$ сут, при действии постоянных, но различных по величине температур в 20, 30, 40 и 50°C

Fig. 2. The curves of the creep measures of concrete loaded at the age of $\tau = 135$ days, under the action of constant but varying temperatures in 20, 30, 40 and 50 °C

Таким образом, методика построения кривых мер ползучести в координатах приведенного времени, в условиях постоянных, но различных по величине температур, подтверждает экспериментальные данные и отражает необходимые характерные зависимости, описываемые авторами научных трудов [2].

Большой практический интерес представляет собой ситуация, в которой бетонная конструкция твердеет в условиях переменных, ступенчато повышающихся во времени температур. В этом случае, как было доказано экспериментально, имеет место эффект температурного последействия, заключающийся в интенсивном нарастании скорости деформаций ползучести при ступенчатом повышении температуры и проявляющийся однократно при условии периодического изменения температуры на одинаковую величину ступени.

Алгоритм построения кривых мер ползучести согласно зависимостям, отражающим эффект температурного последействия, подробно описан в [11]. Было доказано, что данная методика дает заниженные значения деформаций ползучести и не отражает наблюдаемого в опытах интенсивного нарастания деформаций ползучести бетона после повышения температуры.

Тем не менее, было предложено решать подобные задачи со ступенчатым повышением температуры согласно методике приведенного времени, позволяющей учесть эффект температурного последействия и получить достаточно точные результаты теоретических кривых ползучести, согласовывающихся с результатами экспериментальных данных.

Таким образом, аналитическое представление удельных деформаций ползучести стареющего бетона при переменных, ступенчато повышающихся во времени температурах, на основании работ Б.А. Гаврилина и А.В. Малькевича [2-3], следует принимать согласно зависимости (7):

$$c(t, \tau, T) = \sum \varphi(t_{прис}) \cdot \Delta f(t - \tau) \cdot K(T) + \Delta T \cdot \sum \varphi(t_{прис}) \cdot \Delta N(t - t_i), \quad (7)$$

где ΔT - разность действующих температур окружающей среды;

$\Delta N_T(t-t_i)$ - единичная функция температурного последствия, являющаяся функцией приращения деформаций ползучести, вызванной изменением вязких свойств геля цементного камня при повышении температуры окружающей среды на 1°C.

Единичная функция температурного последствия зависит только от величины температурного перепада, испытываемого конструкцией. При равных длительностях воздействия температур, повышающихся на один и тот же перепад, равный $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, функция может быть аппроксимирована одной зависимостью вида (8):

$$\Delta N(t-t_i) = \frac{A}{10} \cdot [1 - e^{-\gamma \cdot (t-t_i)}], \quad (8)$$

где A, γ - эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств бетона. Для рассматриваемого случая, принимаем $A = 0,27 \cdot 10^{-6}$; $\gamma = 0,4$;

$(t-t_i)$ - продолжительность воздействия определенной температуры.

В целях верификации результатов исследования, рассмотрим бетонную конструкцию, загруженную в возрасте $\tau = 4$ сут, при воздействии ступенчато повышающихся температур в 9, 20, 30, 40 и 50°C, продолжительностью действия каждой ступени в 6 сут (рис. 3).

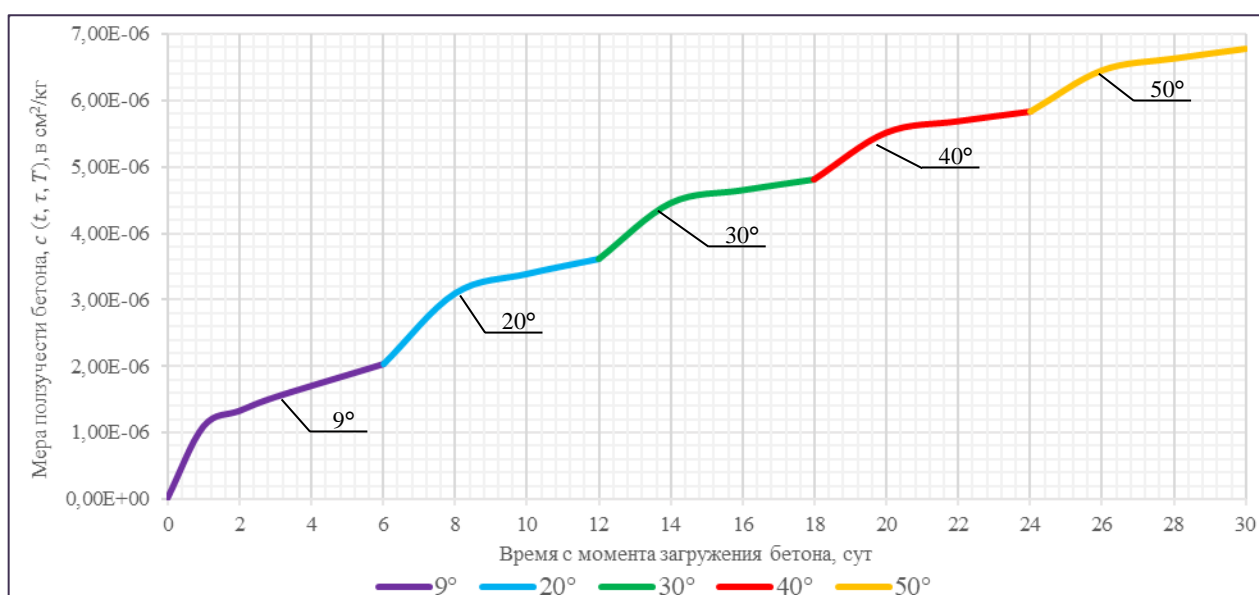


Рис. 3. Кривые мер ползучести бетона, загруженного в возрасте $\tau = 4$ сут, при действии переменных, ступенчато повышающихся во времени температур в 9, 20, 30, 40 и 50°C

Fig. 3. The curves of the creep measures of concrete loaded at the age of $\tau = 4$ days, under the action of variable, stepwise increasing temperatures in time at 9, 20, 30, 40 and 50 °C

В случае, когда рассматриваемая бетонная конструкция стареет в условиях переменных, но уже ступенчато понижающихся температур, никакого эффекта температурного последствия не возникает. Более того, кривая меры ползучести бетона в данном случае будет описываться зависимостью (1), как и в условиях действия постоянных, но различных по величине температур окружающей среды, что значительно упрощает их аналитическое построение, за исключением гипотезы приведенного времени, которая будет уже выражаться формулой (5). Результаты аналитического представления кривой меры ползучести бетонной конструкции, загруженной в возрасте $\tau = 4$ сут, при воздействии ступенчато понижающихся температур в 9, 20, 30, 40 и 50°C, с продолжительностью действия каждой ступени в 6 сут, представлены на рис. 4.

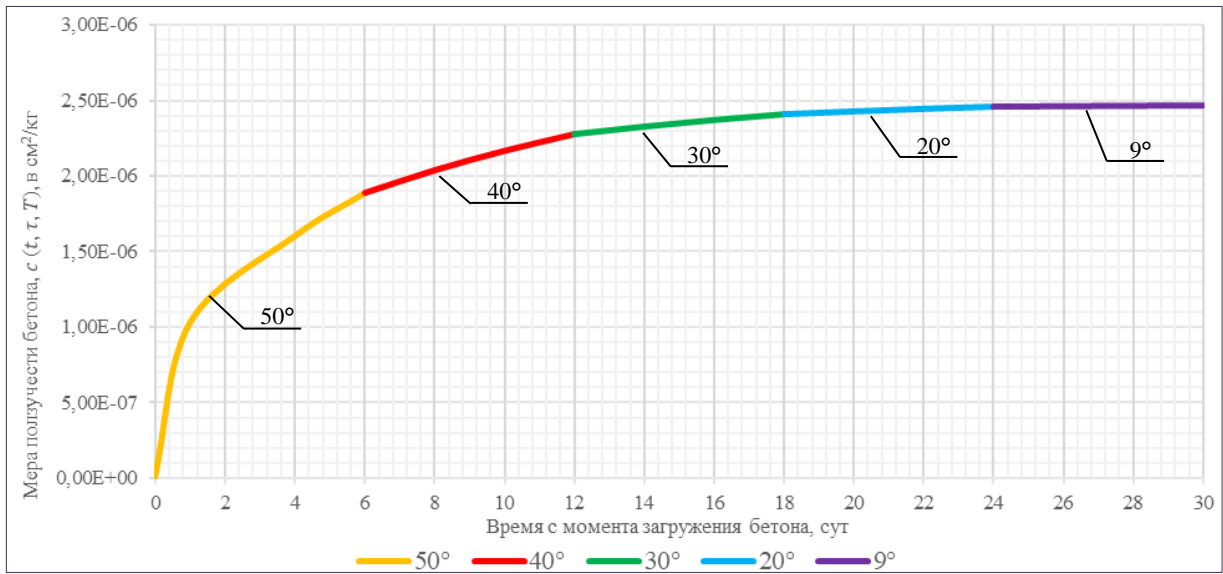


Рис. 4. Кривые мер ползучести бетона, загруженного в возрасте $\tau = 4$ сут, при действии переменных, ступенчато понижающихся во времени температур в 9, 20, 30, 40 и 50°C.

Fig. 4. Curves of creep measures of concrete loaded at the age of $\tau = 4$ days, under the action of variable, stepwise decreasing temperatures in time at 9, 20, 30, 40 and 50 °C.

Видно, что полученные кривые меры ползучести стареющего бетона в условиях переменных, ступенчато повышающихся и понижающихся температур, в значительной мере отражают характерные зависимости, описанные авторами в научных работах и подтверждают опубликованные экспериментальные данные [2].

Стоит отметить важность учета изменяющихся температур в процессе твердения бетона и их непосредственное влияние на конечную ползучесть конструкции. С целью согласования полученных результатов, зададимся конструкцией, загруженной в возрасте $\tau = 4$ сут, и рассмотрим значения меры ползучести при изотермическом старении под воздействием постоянных температур в 9, 20, 30, 40 и 50°C и при ступенчато повышающихся и понижающихся температур заданного диапазона, по достижении 30 сут с момента загрузки конструкции. Результаты сравнения сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Сравнение значений мер ползучести бетона при различных способах температурного воздействия
 Table 1. Comparison of the values of concrete creep measures under different methods of temperature exposure

День, сут	Мера ползучести бетона, $c(t, \tau, T)$, (см ²)/кг · 10 ⁶						
	9°	20°	30°	40°	50°	Ступенчато понижающиеся температуры	Ступенчато повышающиеся температуры
1	1,087	1,195	1,300	1,233	1,024	1,024	1,087
2	1,323	1,453	1,578	1,496	1,242	1,242	1,323
3	1,531	1,679	1,822	1,724	1,432	1,432	1,531
4	1,716	1,878	2,037	1,925	1,600	1,600	1,716
5	1,881	2,056	2,227	2,103	1,750	1,750	1,881
6	2,029	2,214	2,398	2,262	1,885	1,885	2,029
7	2,162	2,357	2,550	2,405	2,007	1,964	2,921
8	2,282	2,485	2,688	2,534	2,118	2,037	3,101
9	2,390	2,602	2,813	2,651	2,219	2,104	3,255
10	2,489	2,707	2,926	2,757	2,312	2,167	3,390
11	2,579	2,803	3,029	2,854	2,398	2,225	3,510
12	2,661	2,891	3,123	2,943	2,476	2,279	3,616
13	2,736	2,971	3,209	3,025	2,549	2,304	4,343
14	2,804	3,045	3,288	3,100	2,616	2,327	4,456
15	2,867	3,112	3,361	3,169	2,678	2,349	4,558

День, сут	Мера ползучести бетона, $c(t, \tau, T)$, (см ²)/кг · 10 ⁶						
	9°	20°	30°	40°	50°	Ступенчато понижающиеся температуры	Ступенчато повышающиеся температуры
16	2,925	3,174	3,427	3,233	2,736	2,369	4,650
17	2,978	3,231	3,489	3,292	2,790	2,388	4,734
18	3,027	3,283	3,545	3,346	2,840	2,406	4,810
19	3,072	3,332	3,598	3,397	2,886	2,415	5,419
20	3,114	3,376	3,646	3,443	2,929	2,424	5,519
21	3,152	3,418	3,691	3,487	2,969	2,433	5,610
22	3,187	3,456	3,732	3,527	3,007	2,441	5,692
23	3,220	3,491	3,771	3,564	3,042	2,448	5,768
24	3,251	3,524	3,806	3,599	3,074	2,455	5,837
25	3,279	3,555	3,839	3,632	3,105	2,458	6,358
26	3,305	3,583	3,870	3,662	3,133	2,460	6,461
27	3,329	3,609	3,898	3,690	3,160	2,462	6,554
28	3,352	3,634	3,925	3,716	3,185	2,464	6,639
29	3,373	3,656	3,950	3,740	3,208	2,466	6,716
30	3,392	3,677	3,973	3,763	3,230	2,468	6,786

Согласно полученным данным, ползучесть бетона при ступенчато повышающихся температурах с 9° до 50°, к 30 дню после начала загрузки конструкции, будет превышать в 1,7 раза ползучесть той же бетонной конструкции, твердевшей в изотермических условиях при температуре в 30°, и в 2,1 раза для изотермического старения при температуре в 50°. При этом, стоит отметить, что ступенчатое понижение температуры значительно снижает ползучесть бетона, что проявляется с самого начала загрузки конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При определении ползучести бетонных конструкций, необходимо учитывать температурные условия окружающей среды, в которой происходит твердение бетона, в особенности, ступенчатый характер изменения температуры, приводящий к значительному увеличению ползучести бетона при ее повышении.

Учитывая высокую степень согласования полученных результатов с опубликованными данными экспериментов, можно использовать приведенную методику для учета температурных воздействий при расчете железобетонных конструкций с учетом дополнительных факторов, таких, как нелинейные деформации ползучести бетона, температурные воздействия, перераспределение напряжений, геометрическая нелинейность и возникновение трещин в растянутой зоне конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев П.И. Некоторые вопросы ползучести бетона: Автореф. дис. ... доктора техн. наук. Л.: ЛПИ. 1963. 29 с.
2. Гаврилин Б.А. Влияние температурного режима на ползучесть стареющего бетона: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л. 1970. 23 с.
3. Малькевич А.Б. Термоползучесть старого теплоизолированного бетона (экспериментально-теоретическое исследование при различных режимах нагружений и нагрева): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1988. 24 с.
4. Васильев П. И., Гаврилин Б. А. Влияние температуры на ползучесть стареющего бетона // Ползучесть и усадка бетона. – М.: Стройиздат. 1969. С. 9-20.
5. Страхов Д.А. Статический расчет стержневых железобетонных конструкций с трещинами в растянутой зоне при нелинейной ползучести бетона: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1977. 16 с.
6. Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В. О повышении пластичности гидротехнических бетонов // Гидротехническое строительство. 2007. №5. С. 24-28. EDN: IANKQD
7. Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Шевелев М.В. Термическая трещиностойкость бетона фундаментных плит // Популярное бетоноведение. 2009. №1. С. 70-76. EDN: SBGJUZ
8. Korsun V., Vatin N., Korsun A., Nemova D. Physical-mechanical properties of the modified fine-grained concrete subjected to thermal effects up to 200 (2014) Applied Mechanics and Materials, 633-634, pp. 1013-1017. EDN: SNCVNR

9. Rybakov V., Panteleev A., Sharbabchev G., Epshtein E. Show-retaining system as a temporary decision for providing of the suitable temperature and humidity level of pitched roofs. (2014) Applied Mechanics and Materials, Vol. 584-586, Pp. 982-990. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.982 EDN: SMOXIT

10. Запорожец И. Д. Основы теории теплопроводности бетона // Научно-техническое совещание по изучению свойств бетона, определяющих его трещиностойкость в массивных гидротехнических сооружениях. 1963. С. 38-51.

11. Семенов К.В., Константинов И.А., Савченко И.А., Кокорева К.А., Нестеров А.А. Эффект температурного воздействия в расчетах термонапряженного состояния дискретно наращиваемых бетонных тел // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №5(32). С. 18-28. EDN: UKGYTP

ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Михайлович Кабанов – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: kabanov.dm@edu.spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy M. Kabanov – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: kabanov.dm@edu.spbstu.ru

УДК 69.07

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ С-44-1.5 ММ, С-21-1.5 ММ, СИМС-D02-01А 1.6

В.Т. Бондарь

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. Профилированный лист широко используется в строительстве. Основное предназначения профилированного листа – несущая и ограждающая конструкция покрытия. В последнее время все чаще появляются исследования, направленные на определение несущей способности, в том числе и потери устойчивости профилированных листов. Авторами были проведены численные исследования центрально сжатых стенок профилированного листа с целью определения их формы потери устойчивости, а также критического напряжения, при котором происходит потеря устойчивости. Численные исследования были выполнены в расчетном комплексе ANSYS в линейной подстановке. Рассматривались 3 участка стены длиной 2 м, высотой – 2,591 м, что соответствует высоте контейнера ICC в соответствии с ГОСТ Р 53350-2009. Исследовались профилированные листы с маркой С320 следующих наименований: С-44-1.5 по каталогу ООО «ЗНМИ» (завод нестандартных металлических изделий), С-21-1.5 по ТУ 1122-004-64618832-2015 и СИМС-D02-01А 1.6Х1116Х2400 DV по ISO DRY CONTAINER REPAIRING SPARE PARTS CATALOG 2019 Edition. Геометрические размеры представленные в каталоге ООО «ЗНМИ», а также в ТУ 1122-004-64618832-2015 совпадают с размерами для профилей С-44, С-21 по ГОСТ 24045-2016. По результатам были определены характерные формы потери устойчивости, а также определены критические напряжения.

Ключевые слова: профилированный лист; напряженно-деформированное состояние; общая потеря устойчивости; местная потеря устойчивости; численные исследования; несущая способность.

Ссылка для цитирования: Бондарь В.Т. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния профилированных листов С-44-1.5 мм, С-21-1.5 мм, СИМС-D02-01А 1.6 // Инженерные исследования. 2022. №3 (8). С. 11-19. EDN: EGTJJI

COMPARATIVE ANALYSIS OF STRESS-DEFORMED STATE OF PROFILED SHEETS C-44-1.5 MM, C-21-1.5 MM, CIMC-D02-01A 1.6

V.T. Bondar

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. Profiled sheet is mainly used as a cladding material, however, recently there have been studies aimed at determining the bearing capacity, including the buckling of profiled sheets. The authors carried out numerical studies of the centrally compressed walls of a profiled sheet in order to determine their form of buckling, as well as the critical stress at which buckling occurs. Numerical studies were carried out in the calculation complex PLM Femap 10.1 Nastran in linear substitution. We considered 3 sections of the wall 2 m long, 2.591 m high, which corresponds to the height of the ICC container in accordance with GOST R 53350-2009. We investigated profiled sheets with the C345 steel grade of the following names: C-44-1.5, C-21-1.5 according to GOST 24045-2016 and CIMC-D02-01A 1.6X1116X2400 DV according to ISO DRY CONTAINER REPAIRING SPARE PARTS CATALOG 2019 Edition. Based on the results, the characteristic forms of buckling were determined, and the critical stresses were also determined.

Keywords: profiled sheet; stress-strain state; general loss of stability; local loss of stability; numerical research; load bearing capacity.

For citation: Bondar V.T. Comparative analysis of stress-deformed state of profiled sheets C-44-1.5 mm, C-21-1.5 mm, CIMC-D02-01A 1.6 // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.3 (8). Pp. 11-19. EDN: EGTJJI

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все сильнее развивается модульное строительство из металлических блок-модулей. По всему миру построены или строятся отели, апартаменты, поликлиники, казармы, общежития из блок-модулей.

Различают два вида блок-модулей: каркасного и стенового типа. Каркасный блок-модуль представляет из себя прямоугольный каркас, собранный из стержней. Стеновые блок-модули в большинстве своем представлены морскими контейнерами.

В настоящее время в России использование морских контейнеров в качестве блок модулей плохо развито, в том числе из-за сложного и трудоемкого расчета стенки контейнера, то есть профилированного листа, как несущего элемента.

Легкие стальные тонкостенные конструкции представляют собой холодногнутые стержни из тонколистового проката, то есть проката толщиной до 4 мм. Таким образом профилированный лист можно назвать тонкостенной конструкцией. В СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей» представлен расчет трапециевидных гофрированных листов, т.е. профилированных листов на критические напряжения, при которых происходит потеря устойчивости профилированного листа. Основная схожесть профилированного листа с тонкостенным профилем – редукция сечения. Редукцией называют процесс местной потери устойчивости стенки профиля.

Многие авторы занимались исследованием несущей способности как профилированных листов, так и легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) в целом. Исследование несущей способности профилированных листов, а также рекомендации по численному моделированию профилированных листов указаны в работе В.Г. Низамеева, Ф.Ф. Башарова [1]. Изучая напряженно-деформированное состояние плит покрытий, состоящих из профилированного настила, подкрепленного шпренгельной системой, В.Г. Низамеев, Ф.Ф. Башаров исследовали влияние на несущую способность профнастила следующих факторов. Расстояние между профилированным настилом и шпренгельной системой, а также силы предварительного напряжения шпренгельной системы [2]. Аналитическая модель для расчета профилированных секций на сжатие с изгибом, а также методика проведения испытаний профилированных листов на сжатие с изгибом представлена в работе И.И. Ведяков, Д. В. Соловьев, А.И. Коваленко [3]. Для изгибаемого элемента подобная методика проведения расчета и испытаний предложена в [4]. Численные исследования стоек С-профиля с учетом начальных несовершенств описаны в статье [5] Т.В. Назмеевой.

Учеными Ф. Ванга, Я. Лянб, О. Чжаоа [6] было проведено исследование тонкостенного С-образного профиля из сверхпрочной стали S960 UHSS на продольно-поперечный изгиб. В ходе исследования проводились как натуральные, так и численные эксперименты сжатия с изгибом С-образных колонн. Ш. Чен [7] разработал нелинейную модель КЭ, которая может учитывать как геометрические, так и физические начальные несовершенства. В своей статье [8] Л. Берточча, Д. Компариния, Д. Лаваккиниб, М. Орландок, Л. Сальваторик, П. Спинелли представили результаты экспериментального исследования тонкостенных стальных стоек систем паллет-стеллажи на осевое и внецентренное сжатие. Вопросы устойчивости тонкостенного профиля открытого сечения исследовал в своей кандидатской работе [9] Астахов И.В. Им была сформулирована методика определения упругих пространственных деформаций. Разработкой математической модели и созданием алгоритма расчета местной потери устойчивости на основе дифференциального уравнения прогибов Софи-Жермен занимался Холкин Е.Г. [10].

СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СХЕМЫ СТЕНКИ КОНТЕЙНЕРА

Контейнер представляет собой металлическую раму с вшитыми в нее профилированными листами (рис.1). Таким образом, если рассмотреть отдельную стенку контейнера, то ее можно представить жестко защемленной по нижней грани и по верхней граням, так как в этих местах происходит сварка профилированного листа и профиля. Основным отличием верхнего и нижнего закрепления является фиксация по вертикальной оси. Снизу закрепление по вертикальной оси ограничено. Боковые стенки шарнирно закреплены по всем направлению. Обеспечивается это сваркой профлиста и вертикального профиля.

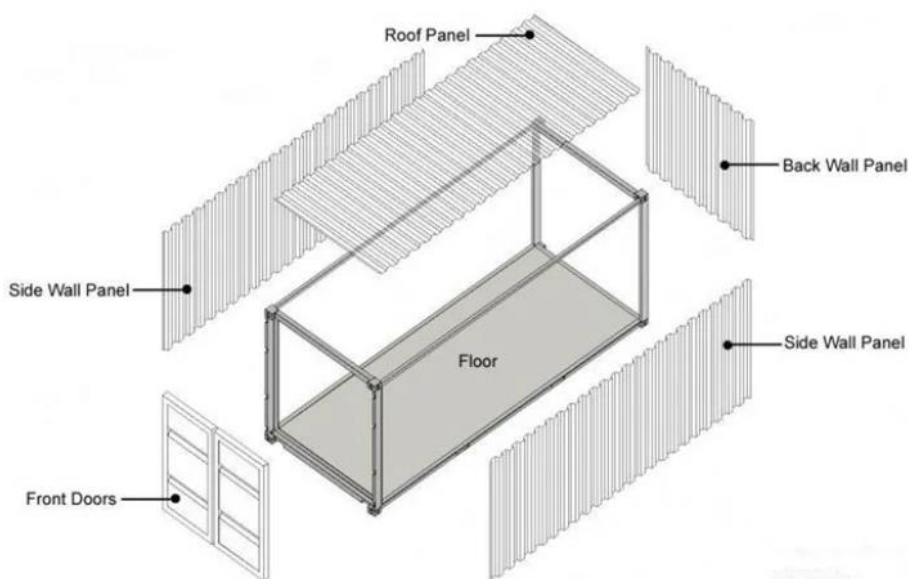


Рис.1. Конструктивная схема морского контейнера
Fig.1. Structural scheme of a sea container

В качестве исследования были проведены численные эксперименты на центральное (осевое) сжатие профилированных листов С-44-1.5, С-21-1.5 и СИМС-D02-01А 1.6Х1116Х2400 DV с маркой стали С345. Расчет на центральное сжатие является допущением, так как определение точной передачи нагрузки с вышележащего контейнера является трудновыполнимой задачей. Численное испытание проводилось для участка стены длиной 2 м, высотой – 2,591 м, что соответствует высоте контейнера 1СС в соответствии с ГОСТ Р 53350-2009. На участки стены из профилированных листов задавалась одинаковая равномерно распределенная нагрузка. Материалом профилированного листа принималась оцинкованная сталь марки С320 по ГОСТ 14918-2020. Указанная марка стали обладает пределом текучести не менее 320 МПа, временным сопротивлением разрыву не менее 390 МПа.

Так как основной целью исследования является определение формы потери устойчивости стенки профилированного листа, а также коэффициента запаса устойчивости, то физический смысл нагрузки, а значит и ее величина не являются важными составляющими. Равномерно распределенная нагрузка была представлена в виде совокупности сосредоточенных нагрузок, приложенных к центру тяжести одного гофра, откуда с помощью Rigid элементов нагрузка распределялась на узлы гофра. Расчетную конечно-элементную схему стенки контейнера в первом приближении можно представить как профилированный лист, который шарнирно-неподвижно закреплен снизу, шарнирно-подвижно закреплен сверху, по бокам шарнирно-неподвижное закрепление (рис.2).

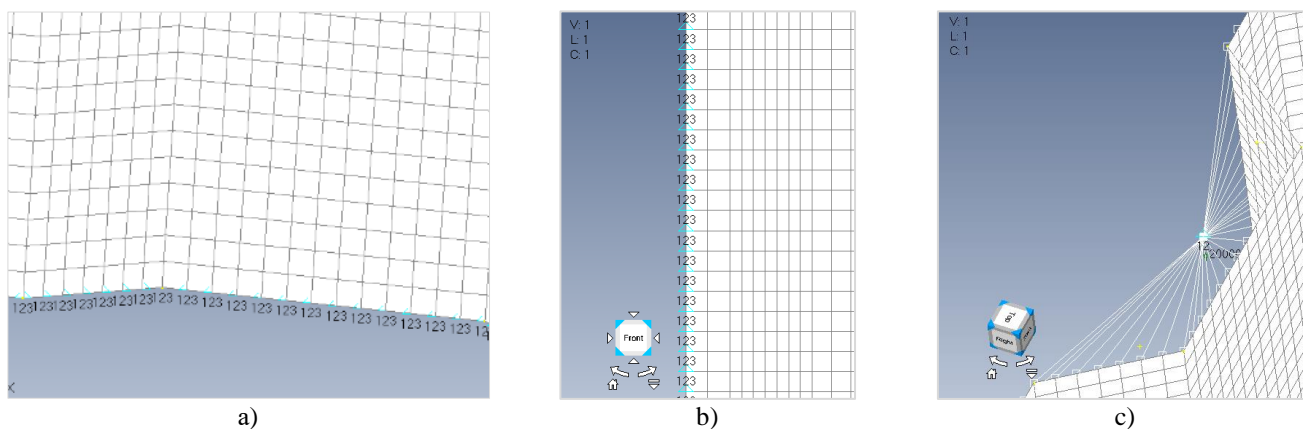


Рис.2. Закрепление профилированного листа: а – шарнирно-неподвижное закрепление основания профилированного листа; б – шарнирно-неподвижное закрепление боковых граней профилированного листа; с – шарнирное закрепление верхней грани профилированного листа через Rigid элемент

Fig. 2. Fastening of the profiled sheet: a - hinged-fixed fastening of the base - fastening of the profiled sheet; b - hinged-fixed fastening of the lateral edges of the profiled sheet; c - hinged fastening of the upper edge of the profiled sheet through the Rigid element

Профилированные листы представлены пластинчатыми конечными элементами типа Plate (универсальный оболочечный элемент). Геометрия листов определялась на основании ГОСТ 24045-2016 и ISO DRY CONTAINER REPAIRING SPARE PARTS CATALOG 2019 Edition для листов С-44-1.5, С-21-1.5 и СИМС-D02-01А 1.6Х1116Х2400 DV соответственно. В расчетную схему импортировались срединные линии профилей гофров.

На профилированный лист в общей сложности приходилась распределенная нагрузка 100 кН/м, что соответствует величине 10,2 т/м. Распределенная нагрузка задавалась путем задания сосредоточенной узловой нагрузки, приложенной к Rigid элементу, расположенному в центре тяжести гофра (рис.3; рис.4; рис.5). Значение узловой нагрузки определяется путем деления сосредоточенной нагрузки на метр ширины стенки на количество гофров в этом метре. Для С-44-1.5 $F=100000/5=20000$, для С-21-1.5 $F=100000/10=10000$, для СИМС-D02-01А 1.6Х1116Х2400 DV $F=100000/3,5=28571$.

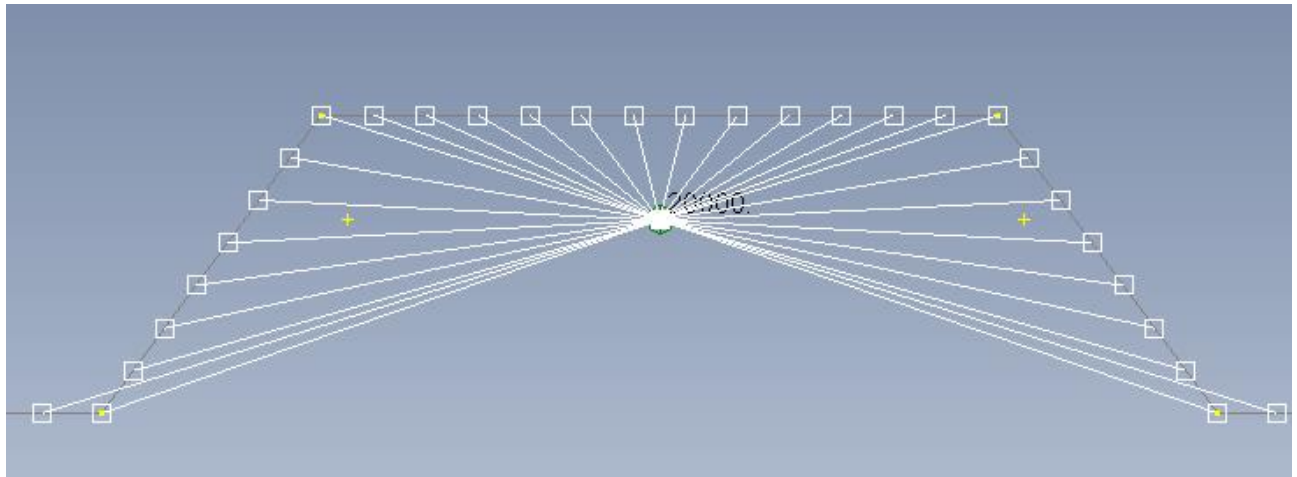


Рис.3. Узловая нагрузка на Rigid элемент для профилированного листа С-44-1.5
Fig. 3. Nodal load on a Rigid element for C-44-1.5 profiled sheet

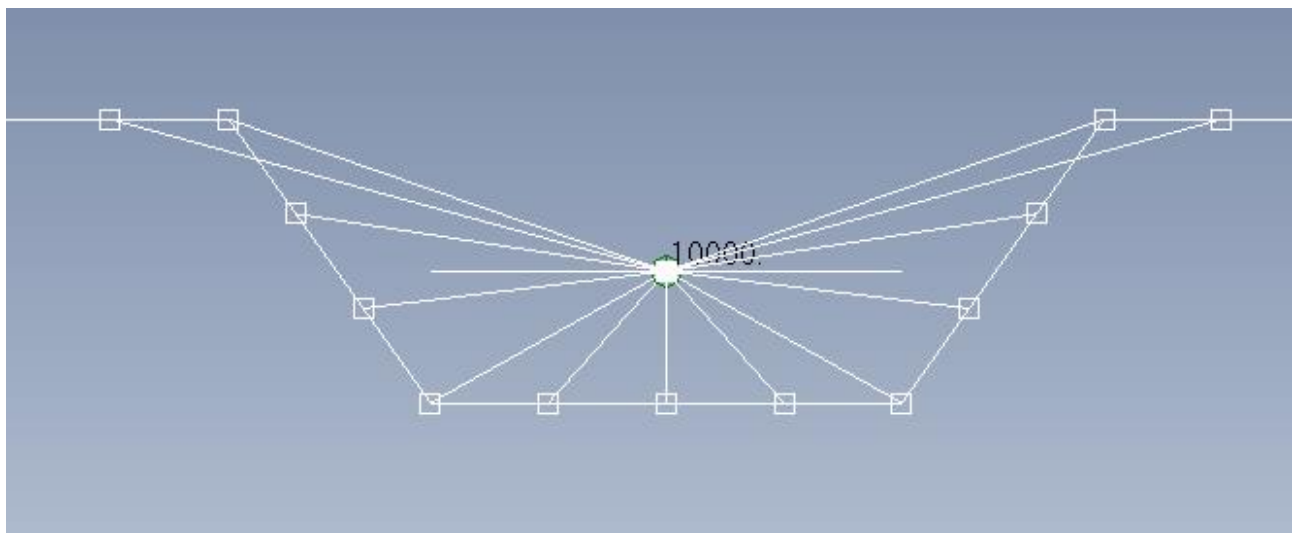


Рис. 4. Узловая нагрузка на Rigid элемент для профилированного листа С-21-1.5
Fig. 4. Nodal load on Rigid element for C-21-1.5 profiled sheet

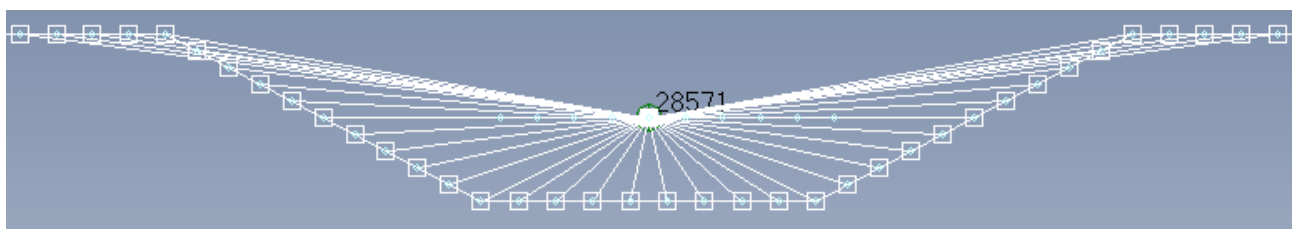


Рис.5. Узловая нагрузка на Rigid элемент для профилированного листа СИМС-D02-01А 1.6Х1116Х2400 DV
Fig. 6. Nodal load on Rigid element for profiled sheet СИМС-D02-01А 1.6Х1116Х2400 DV

Расчеты выполнялись в упруго линейной постановке в режиме «Buckling» при постоянной нагрузке на элементы. В результате исследования было получено 5 форм потери устойчивости стенки (нас интересует только 1 форма), а также определены коэффициенты запаса устойчивости β_1 , и критические усилия, возникающие в стенке. Потеря устойчивости элементов стенки происходила до потери прочности элемента стенки.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ

Для стенки из профилированного листа С-44-1.5 характерна потеря местной устойчивости полки профлиста с коэффициентом запаса устойчивости $\beta_1=4,272$. Изополя продольных напряжений профлиста С-44-1.5 приведены ниже (рис.6). Форма потери устойчивости элементов стенки, а также значение коэффициента β_1 приведены ниже (рис.7).

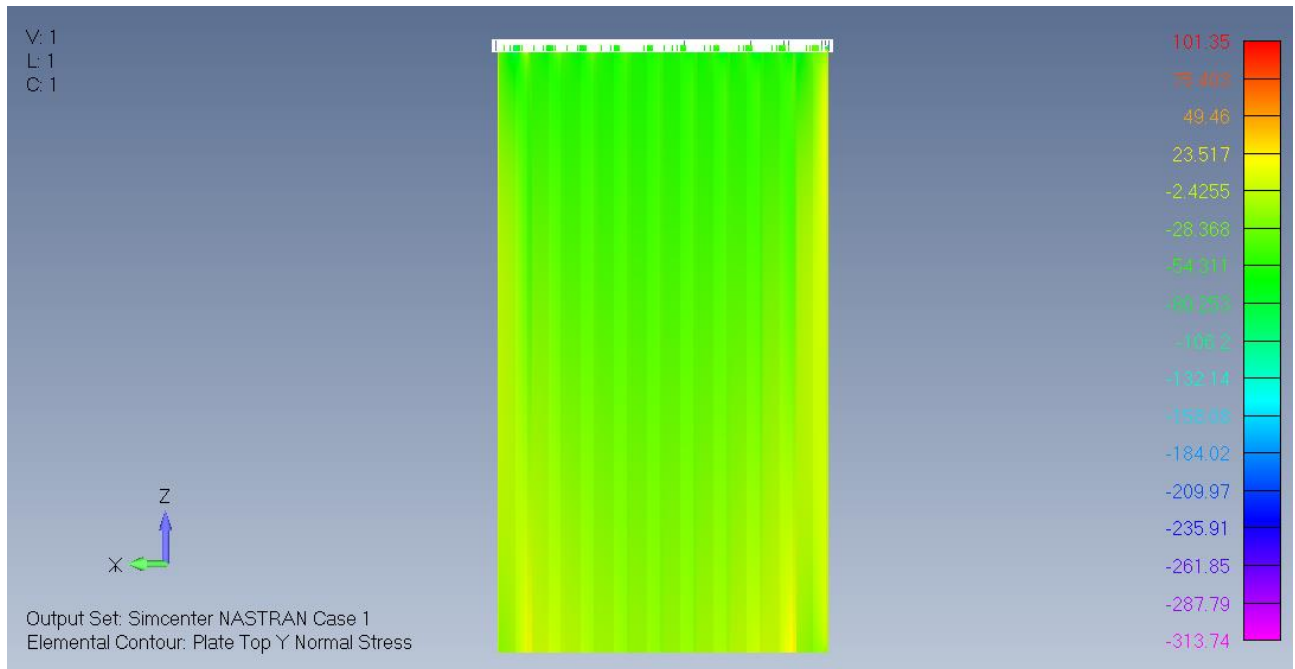


Рис.6. Изополе продольных напряжений профлиста С-44-1.5
Fig. 6. Isofield of longitudinal stresses of profiled sheet S-44-1.5

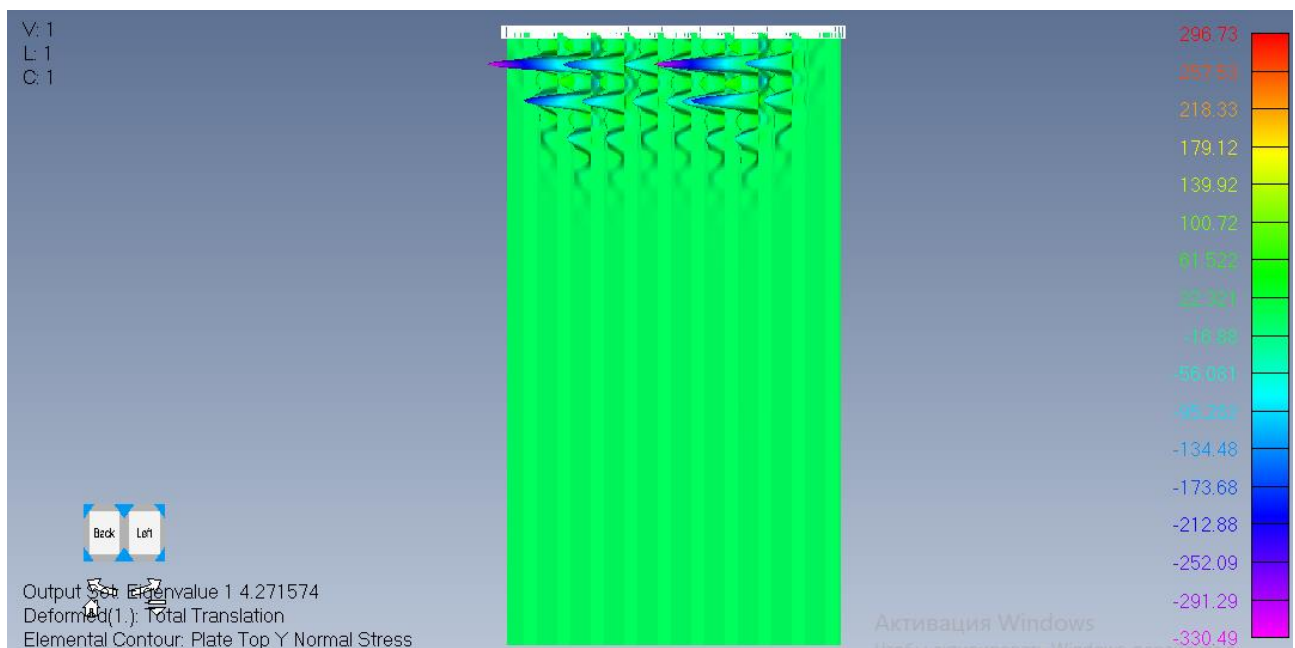


Рис.7. Первая форма потери устойчивости стенки профиля С-44-1.5
Fig. 7. The first form of buckling of the C-44-1.5 profile wall

Как видно самой напряженной частью профилированного листа является участок, расположенный непосредственно под нагрузками, следовательно, именно в этом месте наиболее вероятно появление потери устойчивости. Это мы и наблюдаем (рис.7). Также стоит отметить, что для профилированного листа С-44-1,5 характерна локальная потеря устойчивости наиболее напряженных профилей.

Для стенки из профилированного листа С-21-1.5 характерна потеря общей устойчивости профлиста с коэффициентом запаса устойчивости $\beta_1=1,217$. Изополя продольных напряжений профлиста С-21-1.5 приведены на ниже (рис.8). Форма потери устойчивости элементов стенки, а также значение коэффициента β_1 приведено ниже (рис.9).

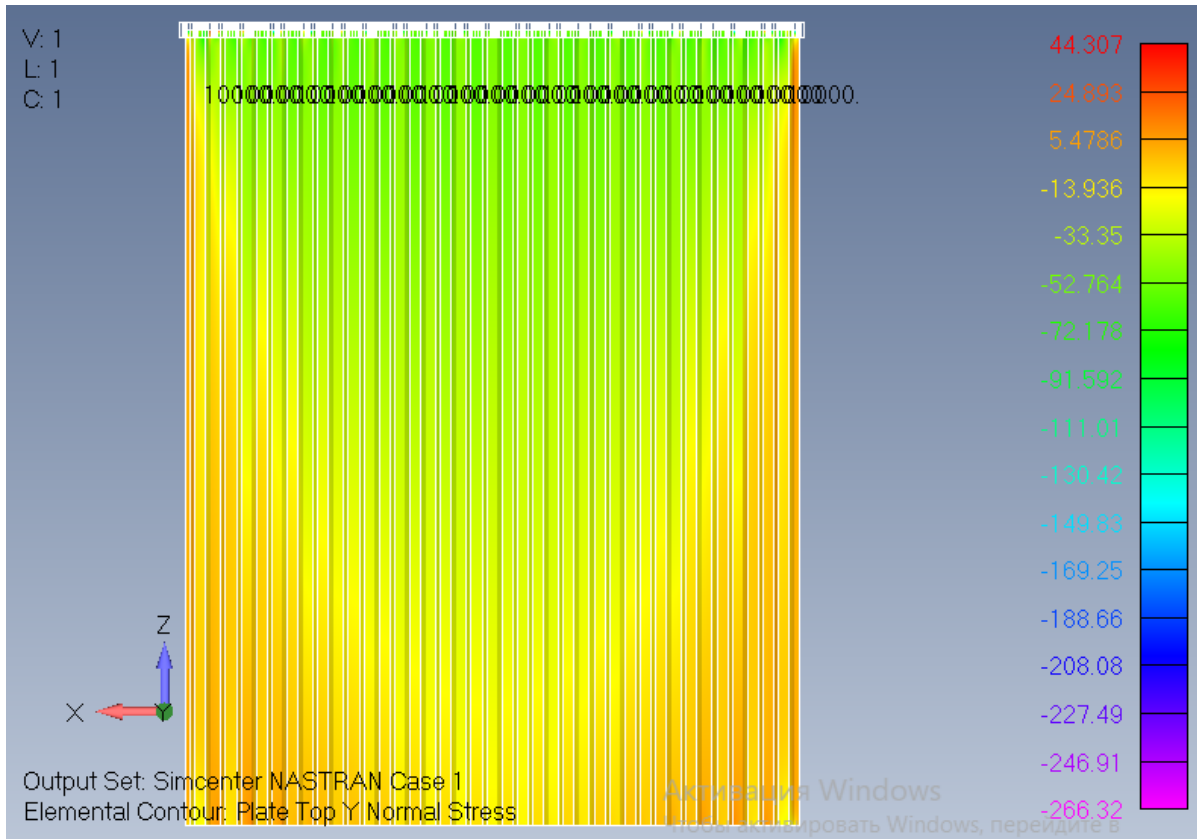


Рис.8. Изополе продольных напряжений профлиста С-21-1.5
Fig. 8. Isofield of longitudinal stresses of profiled sheet S-21-1.5

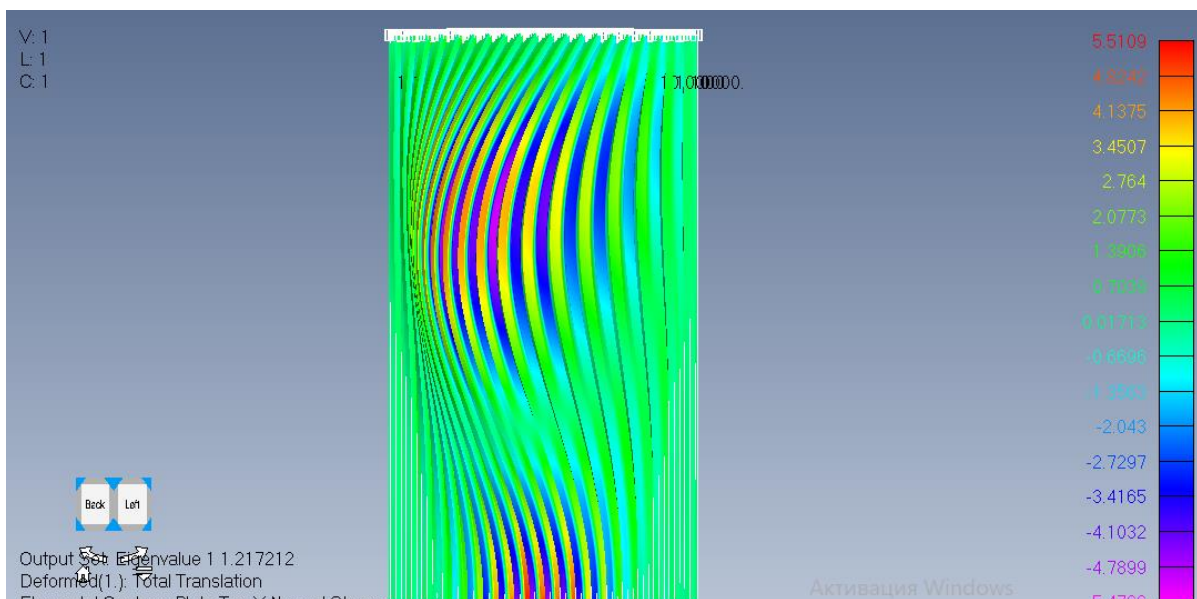


Рис.9. Первая форма потери устойчивости стенки профиля С-21-1.5
Fig. 9. The first form of buckling of the C-21-1.5 profile wall

Для стенки из профилированного листа СИМС-D02-01А 1.6 характерна потеря местной устойчивости профлиста с коэффициентом запаса устойчивости $\beta_1=4,08$. Изополя продольных напряжений профлиста СИМС-D02-01А 1.6 приведены на ниже (рис.10). Форма потери устойчивости элементов стенки, а также значение коэффициента β_1 приведено ниже (рис.11).

Как видно из рис.9, самой напряженной частью профилированного листа является участок, расположенный непосредственно под центральными нагрузками. Также стоит отметить, что для профилированного листа С-21-1.5. характерна общая потеря устойчивости всего профилированного листа.

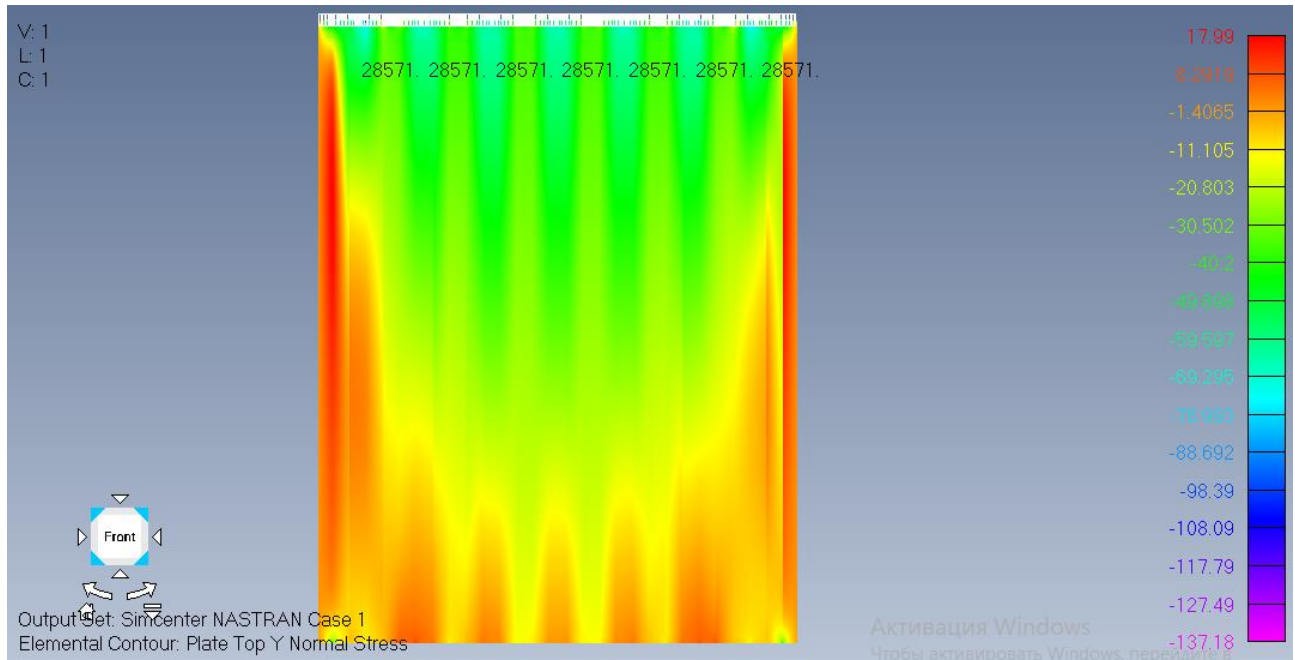


Рис.10. Изополе продольных напряжений профлиста СИМС-D02-01А 1.6
Fig. 10. Isofield of longitudinal stresses of profiled sheet СИМС-D02-01А 1.6

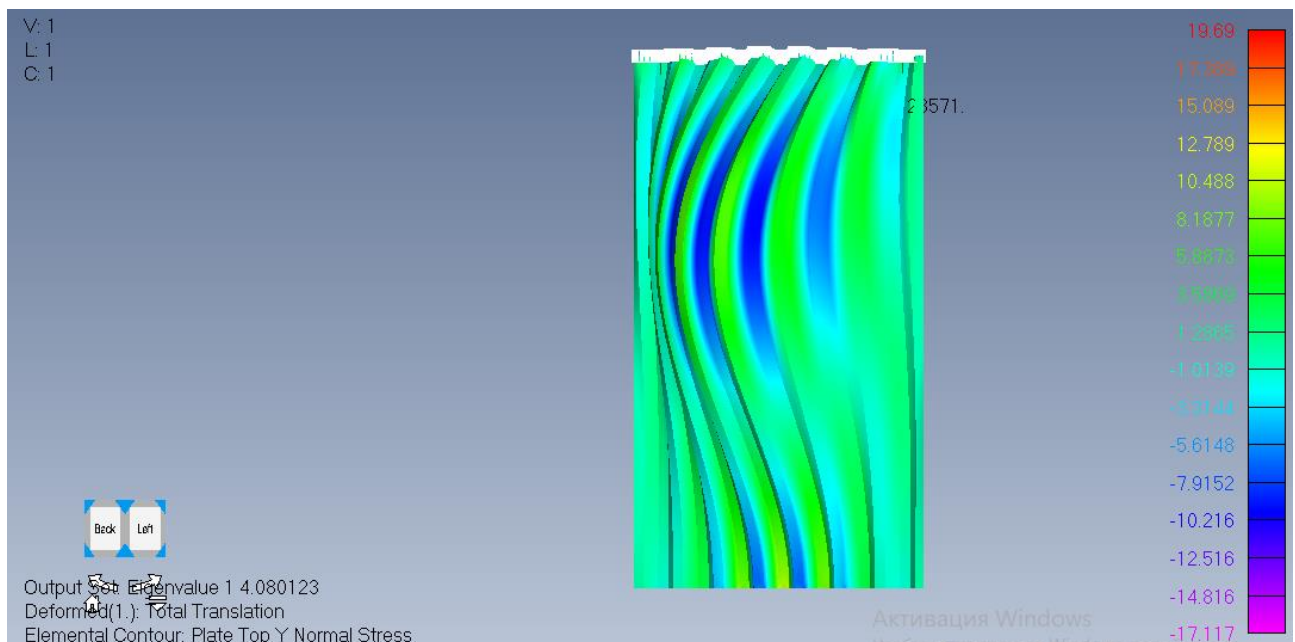


Рис.11. Первая форма потери устойчивости стенки профиля СИМС-D02-01А 1.6
Fig.11. The first form of buckling of the СИМС-D02-01А profile wall 1.6

Как видно из рис.11, самой напряженной частью профилированного листа является участок, расположенный непосредственно под центральными нагрузками. Также стоит отметить, что для профилированного листа СИМС-D02-01А 1.6. характерна общая потеря устойчивости всего профлиста.

В большинстве своем потеря устойчивости элементов происходила у краев стенок, что может быть связано с граничными условиями, заданными по краям стенок. Это значит, что требуется более детальное изучение вопроса, в том числе моделирование в нелинейной подстановке.

Стоит отметить получившуюся величину нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости. Нагрузка в 10 т на метр длины кажется большой, однако для профиля С-44-1,5 с минимальным моментом инерции $I_{min} = 10.33 \cdot 10^{-8}$ м критическая сила, т.е. сила, при которой произойдет потеря устойчивости сжатого стержня по Эйлеру составит:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min}}{(\mu \cdot l)^2} = \frac{9.86 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 10.33 \cdot 10^{-8}}{(0.5 \cdot 2.591)^2} = 121.4 \text{ кН} = 12,38 \text{ т.}$$

Однако формула Эйлера не совсем применима к тонкостенному сечению. В тонкостенном профиле из-за крутящих усилий потеря устойчивости для отдельно стоящей гофре профлиста наступит при меньшей нагрузке (рис.12). Нагрузка приложенная на рис.12 соответствует критической нагрузке $P_{кр} = 12,38$ т.

Опираясь на результаты, отображенные на рис.7, можно прийти к выводу, что при нагрузке 80 кН, т.е. около 8 т на гофру произойдет потеря устойчивости стенки. Критическая нагрузка для потери устойчивости стенки выше, чем подобная у одиночного профиля (рис.12), так как соединение с соседними гофрами препятствует потере устойчивости при кручении.

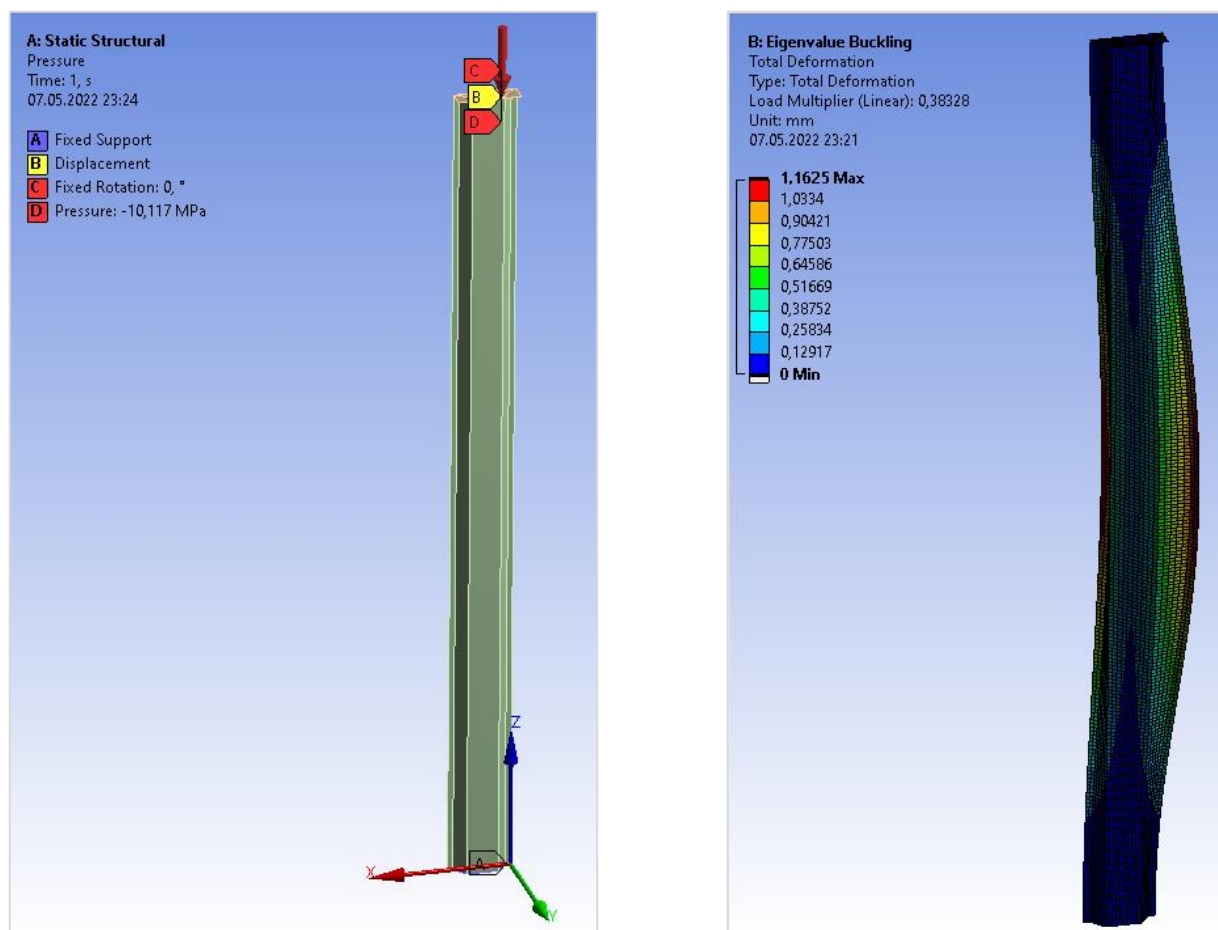


Рис.12. Потеря устойчивости отдельно стоящей части профиля С-44-1,5
Fig.12. Loss of stability of a free-standing part of the C-44-1.5 profile

Профилированные листы С-44-1.5, С-21-1.5 представлены как новый вид профилированных листов, размеры которых, за исключением толщины, совпадают с размерами по ГОСТ 24045-2016. Данные профлисты изготавливаются на заводах как не стандартные изделия. Профилированный лист CIMC-D02-01A 1.6X1116X2400 DV представлен в соответствии с документом ISO DRY CONTAINER REPAIRING SPARE PARTS CATALOG 2019 Edition; данный документ представляет собой каталог деталей морского контейнер по ГОСТ Р 53350-2009 (ИСО 668:1995).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных численных экспериментов на осевое (центральное) сжатие различных профилированных листов стенки контейнера, наиболее устойчивой является стенка из профилированного листа С-44-1.5. Учитывая все вышеперечисленное имеется острая необходимость в проведении дополнительных расчетов и исследований, а именно определение геометрических характеристик гофра, при котором наблюдается переходное состояние потери устойчивости, а также определение коэффициентов, позволяющих гофрированные стенки считать как плоские пластины при общей потере устойчивости последних [11, 12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Низамеев В.Г., Башаров Ф.Ф. Исследование несущей способности профилированного настила при внецентренном сжатии с учетом закритической его работы // Известия Казанского Государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1. С. 95–101.
2. Низамеев В.Г., Башаров Ф.Ф. Исследование несущей способности профилированного настила подкрепленного шпренгельной системой // Известия Казанского Государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 6(84). С. 76–81.
3. Ведяков И.И., Соловьев Д.В., Коваленко А.И. Расчет тонколистовых профилированных секций с двойным гофрированием на сжатие с изгибом // Вестник НИЦ Строительство. 2019. № 2 (21). С. 5–14.
4. Ведяков И.И., Соловьев Д.В., Арменский М.Ю. Теоретические и экспериментальные исследования новых марок профилированного настила // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 2 (211). С. 72–74.
5. Назмеева Т.В., Ватин Н.И. Численные исследования сжатых элементов холодногнутого просечного С-профиля с учетом начальных несовершенств // Инженерно-строительный журнал. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016. № 62. С. 92–101.
6. Ong S.Q. Experimental and numerical studies of pin-ended S960 ultra-high strength steel press-braked channel section columns. Nanyang Technological University, 2019.
7. Shen H.X. Behavior of high-strength steel welded rectangular section beam-columns with slender webs // Thin-Walled Struct. Elsevier Ltd, 2015. № 88. С. 16–27.
8. Bertocci L., Comparini D., Lavacchini G., Orlando M., Salvatori L., Spinelli P. Experimental, numerical, and regulatory P-Mx-My domains for cold-formed perforated steel uprights of pallet-racks // Thin-Walled Struct. Elsevier Ltd, 2017. № 119. С. 151–165.
9. Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей. диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб. СПбГАСУ. 2006. С. 123.
10. Холкин Е.Г. Исследование местной устойчивости тонкостенных трапециевидных профилей при продольно-поперечном изгибе. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. О. ОмГТУ. 2010. С. 118.
11. Бондарь В.Т., Назмеева Т.В., Рыбаков В.А. Напряженно-деформированное состояние стойки из спаренных вложенных друг в друга профилей // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Сборник материалов Всероссийской конференции. 2022. С. 289-292. EDN: FTZQAU
12. Бондарь В.Т., Назмеева Т.В. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния профилированных листов С-44-1.5, С-21-1.5, СИМС-D02-01А 1.6 // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 417-419. EDN: SIFEXD

ОБ АВТОРАХ

Владимир Тарасович Бондарь – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: doodge1997@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Vladimir T. Bondar – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: doodge1997@gmail.com

УДК 692.4

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ «ЗЕЛЕНАЯ КРОВЛЯ»

В.М. Саматова¹, О.С. Гамаюнова²

^{1,2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

Аннотация. На энергетическую эффективность зданий необходимо обращать внимание еще начиная со стадии проектирования. Внедрение в проект энергоэффективных и энергосберегающих технологий во многом позволит сократить энергопотребление зданий, а также обеспечить экономию затрат на отопление. Одним из возможных решений проблемы энергосбережения зданий и сооружений является применение технологии «зеленых кровель». Цель работы - изучить целесообразность использования технологии «зеленая кровля» при строительстве общественных зданий. Для достижения цели в ходе работы были рассмотрены основные типы «зеленых кровель», выявлены их преимущества и недостатки. С помощью теплотехнического расчета на примере высотного бизнес-центра был сделан вывод о том, что «зеленая кровля» способна сократить затраты на отопление за счет высокого сопротивления теплопередаче «зеленого» кровельного настила, который в 1,5 раза превышает сопротивление теплопередаче «стандартной» конструкции кровли. Дополнительные расчеты показали, что экономическая выгода напрямую зависит от отношения площади покрытия к площади ограждающих наружных стен.

Ключевые слова: кровля, кровельное покрытие, зеленая кровля, зеленые крыши, зеленая архитектура, экстенсивное озеленение, интенсивное озеленение, энергоэффективность, устойчивое развитие, городская среда.

Ссылка для цитирования: Саматова В.М., Гамаюнова О.С. Энергоэффективность общественных зданий с применением технологии «зеленая кровля» // Инженерные исследования. 2022. №3 (8). С. 20-29. EDN: ALXIDF

ENERGY EFFICIENCY OF PUBLIC BUILDINGS USING GREEN ROOF TECHNOLOGY

V.M. Samatova¹, O.S. Gamayunova²

^{1,2} Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. The energy efficiency of buildings should be considered from the design stage. The introduction of energy-efficient and energy-saving technologies into the project will largely reduce the energy consumption of buildings, as well as ensure savings in heating costs. One of the possible solutions to the problem of energy saving of buildings and structures is the use of «green roofs» technology. The purpose of the work is to study the feasibility of using the «green roof» technology in the construction of public buildings. To achieve the goal in the course of the work, the main types of «green roofs» were considered, their advantages and disadvantages were identified. Using a thermal engineering calculation using the example of a high-rise business center, it was concluded that the «green roof» can reduce heating costs due to the high heat transfer resistance of the «green roof», which is 1.5 times higher than the heat transfer resistance of the «standard» design roofs. Additional calculations showed that the economic benefit directly depends on the ratio of the coverage area to the area of the enclosing outer walls.

Keywords: roofing, roofing, green roofing, green roofs, green architecture, extensive planting, intensive planting, energy efficiency, sustainable development, urban environment.

For citation: Samatova V.M., Gamayunova O.S. Energy efficiency of public buildings using green roof technology // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.3 (8). Pp. 20-29. EDN: ALXIDF

ВВЕДЕНИЕ

На энергетическую эффективность зданий необходимо обращать внимание еще начиная со стадии проектирования. Внедрение в проект энергоэффективных и энергосберегающих технологий во многом позволит сократить энергопотребление зданий, а также обеспечить экономию затрат на отопление. Одним из возможных решений проблемы энергосбережения зданий и сооружений является применение технологии «зеленых кровель» [1-4].

Технология «зеленая кровля» по типу покрытий подразделяется на экстенсивную и интенсивную. Экстенсивную кровлю следует применять для зданий с малым воспринимаемым весом или для реставраций зданий с заменой обычного покрытия на зелено (при предварительном расчете допустимой нагрузки). Интенсивное озеленение следует применять при новом строительстве для создания дополнительных общественных пространств и мест отдыха. При использовании технологии «зеленая кровля» необходимо еще на этапе проектирования учитывать дополнительные нагрузки, вызванные значительным весом данной кровли [5-7].

Оценка влияния «зеленых кровель» на энергетическую эффективность зданий представлена в работах [8, 9]. Учитывая конструктивные преимущества технологии «зеленая кровля» [5], при грамотном экономическом подходе можно сократить срок окупаемости таких кровель [1, 10, 11]. Отдельное внимание при этом стоит уделить исследованию влажностного режима ограждающих конструкций [12, 13].

Оценить влияние кровельного покрытия на энергоэффективность высотного здания бизнес-центра можно с помощью теплотехнического расчета для двух типов кровель: «стандартной» и «зеленой». Анализ тепло-энергоэффективности выполняется на основании теплотехнического расчета, приведенного в статье [14] и требованиях, изложенных в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003».

Основные характеристики здания бизнес-центра представлены в табл.1 и табл.2.

Таблица 1. Характеристики наружных ограждений
 Table 1. Characteristics of outdoor fences

№ п/п	Тип наружной ограждающей конструкции	Схема ограждения	Структура ограждения, считая от наружной поверхности
1	Вентилируемый фасад		<ul style="list-style-type: none"> – Металлические фасадные кассеты, 60 мм; – Воздушная прослойка, 40 мм; – Утеплитель Техновент стандарт минераловатный, 100 мм; – Газобетон, 200 мм
2	Витраж светопрозрачный		<ul style="list-style-type: none"> – Стеклопакет огнестойкий ФотоТех, 36 мм
3	Полы над неотапливаемым подвалом		<ul style="list-style-type: none"> – Керамогранитные плиты, 20 мм; – Плиточный клеевой раствор Ceresit CM 12, 5 мм; – Цементно-песчаная стяжка армированная, 50 мм; – Теплоизоляция ТЕХНОНИКОЛЬ CARBON PROF, 50 мм; – Гидроизоляция гидромат 2D, 5 мм; – Выравнивающая ЦПС, 20мм; – Железобетонная плита, 200 мм.
4	Стены заглубленных помещений		<ul style="list-style-type: none"> – Гидроизоляция гидромат 2D, 10 мм; – Пароизоляция Бентотех АСЛ 100, 5 мм; – Экструзионный пенополистерол Carbon Prof (утеплитель), 100 мм; – Железобетонная стена, 200 мм.
5	Пол по грунту		<ul style="list-style-type: none"> – Альфапол МБ, 30 мм; – Уклонообразующая ЦПС, 60 мм; – Гидроизоляция гидромат 2D, 10 мм. – Железобетонная плита, 1200 мм.

Таблица 2. Площади наружных ограждающих конструкций бизнес-центра
 Table 2. Areas of external enclosing structures of the business center

№ п/п	Тип наружной ограждающей конструкции	Площадь конструкции, A_i , м ²
1	Наружные стены	
1.1	вентилируемый фасад – A_{c1}	4090,77
1.2	стекло-прозрачный фасад – A_{c2}	12645,80
2	Окна, двери на эксплуатируемые кровли – A_o	1837,50
3	Входные наружные двери	
3.1	стекло-прозрачные – A_{d1}	34,02
3.2	металлические – A_{d2}	3,78
4	Покрытие (совмещенное) – A_k	1475,44
5	Перекрытие над неотапливаемым подвалом – A_n	1770,22
6	Полы по грунту – $A_{пол}$	1845,00
6.1	Стены заглубленных помещений – A_{c3}	1438,77
7	Общая площадь ограждающих конструкций – $A_{ок}^{сум}$	25141,3

Высотный бизнес-центр располагается по адресу: г. Санкт-Петербург, Приморский проспект, участок 83, (восточнее пересечения с Яхтенной улицей). На основании СП 50.13330.2012 и СП 131.13330.2020 определены климатические характеристики района строительства, которые представлены в табл.3.

Таблица 3. Климатические характеристики
 Table 3. Climate characteristics

№ п/п	Показатель	Обозначение параметра	Единица измерения	Расчетное значение
1	Расчетная температура внутреннего воздуха для общественного здания	t_b	°С	19
2	Расчетная температура наружного воздуха в холодный период года	t_n	°С	-26
3	Продолжительность отопительного периода для общественного здания	$z_{от}$	сут/год	211
4	Средняя температура наружного воздуха за отопительный период	$t_{от}$	°С	-1,2
5	Градусо-сутки отопительного периода	ГСОП	°С · сут/год	4262,2

Расчет градусо-суток отопительного периода в табл.3 производился по формуле (1):

$$ГСОП = (t_b - t_{от}) \cdot z_{от} \quad (1)$$

Согласно СП 50.13330.2012 и ГОСТ 30494-2011 принимаем условия эксплуатации для ограждающих конструкций категории – Б.

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ

Для расчета сопротивления теплопередаче будем использовать общий подход, основанный на расчете термического сопротивления для многослойных ограждающих конструкций. В соответствии с СП 50.13330.2012, для сложных составных «пирогов» теплозащитной оболочки здания, необходимо учитывать термическое сопротивление каждого слоя системы в отдельности.

Определим сопротивления теплопередаче на примере «зеленой кровли». Теплотехнические характеристики для каждого слоя кровли в отдельности представлены в табл.4.

Таблица 4. Теплотехнические характеристики слоев «зеленой кровли»
 Table 4. Thermal characteristics of the layers of the «green roof»

№ п/п	Материал	Толщина слоя δ , м	Плотность материала ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ_B , Вт/(м · °С)
1	Субстрат с зелеными насаждениями «Кустарник»	0,3	1400	1,16
2	Дренажные мембраны PLANTER Extra-Geo	0,008	970	0,43
3	Противокорневая пленка Техноэласт Грин	0,004	1250	0,22

№ п/п	Материал	Толщина слоя δ , м	Плотность материала ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ_B , Вт/(м · °С)
4	Гидроизоляция LOGICBASE V-SL – 2 слоя	0,004	1300	0,19
5	Армированная ЦПС	0,05	1800	0,93
6	Разделительный слой полиэтиленовая пленка	0,0001	940	0,36
7	Уклонообразующий слой из керамзитового гравия	0,04	600	0,19
8	Разделительный слой полиэтиленовая пленка	0,0001	940	0,36
9	Утеплитель экструзионный пенополистирол ТЕХНОНИКОЛЬ CARBON PROF	0,2	45	0,032
10	Железобетонная плита	0,2	2500	2,04

Согласно СП 50.13330.2012 общее сопротивление теплопередаче многослойных ограждающих конструкций с однородными слоями определяется по формуле (2):

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_s R_s + \frac{1}{\alpha_H} \quad (2)$$

Где $\alpha_B = 8,7$ Вт/(м² · °С) – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции (согласно табл.4. СП 50.13330.2012);

$\alpha_H = 23$ Вт/(м² · °С) – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции (согласно табл.6. СП 50.13330.2012);

R_s – термическое сопротивление слоя однородной части ограждающей конструкции, (м² · °С)/Вт, определяемое по формуле (3):

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s} \cdot y_s^{y,e} \quad (3)$$

δ_s – толщина слоя, м;

λ_s – расчетная теплопроводность материала слоя, Вт/(м² · °С);

$y_s^{y,e}$ – коэффициент условий эксплуатации материала слоя, доли ед.; принимаем $y_s^{y,e} = 1$ доли ед.

Исходя из формул (2) и (3), получаем общее сопротивление теплопередаче для конструкции «зеленая кровля»:

$$R_0 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,3}{1,16} + \frac{0,008}{0,43} + \frac{0,004}{0,22} + \frac{0,004}{0,19} + \frac{0,05}{0,93} + \frac{0,0001}{0,36} + \frac{0,04}{0,19} + \frac{0,0001}{0,36} + \frac{0,2}{0,032} + \frac{0,2}{2,04} + \frac{1}{23} = 7,08 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}{\text{Вт}}$$

Стоит отметить, что в соответствии с СП 50.13330.2012 необходимо учитывать, что приведенное сопротивление теплопередаче применяемой ограждающей конструкции должно быть больше или равно нормируемому значению $R_0^{\text{норм}}$.

Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче определяется по формуле (4):

$$R_0^{\text{норм}} = R_0^{\text{ТР}} \cdot m_p \quad (4)$$

где $R_0^{\text{ТР}}$ – базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, м² · °С/Вт, (определяется по табл. 3 СП 50.13330.2012);

m_p – коэффициент, учитывающий особенности региона строительства. В расчете принимается равным 1.

Согласно климатическим характеристикам, представленным в табл.3, значение для величины градусо-суток отопительного периода (ГСОП) отличается от указанных в табл.3 СП 50.13330.2012. В этом случае базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче рассчитывается по формуле (5):

$$R_0^{\text{ТР}} = a \cdot \text{ГСОП} + b \quad (5)$$

где ГСОП – градусо-сутки отопительного периода, °С · сут/год;

a , b – коэффициенты, значения которых принимается по табл. 3 СП 50.13330.2012, (м² · °С)/Вт.

Определив все необходимые значения, получаем нормируемое сопротивление теплопередаче по формуле (5) для кровли общественного здания в условиях Санкт-Петербурга:

$$R_0^{\text{норм}} = R_0^{\text{ТР}} = 0,0004 \cdot 4262,2 + 1,6 = 3,305 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт.}$$

Из сравнения полученного и нормируемого сопротивления теплопередаче «зеленой кровли» делаем вывод, что данная ограждающая конструкция удовлетворяет требованиям в отношении сопротивления теплопередаче (6):

$$R_0^{\text{норм}} < R_0 \quad (6)$$

Далее по аналогии проведем анализ сопротивления теплопередаче «стандартной» конструкции кровли. Состав слоев и теплотехнические характеристики «стандартной» кровли представлены в табл.5.

Таблица 5. Теплотехнические характеристики слоев «стандартной» конструкции кровли
 Table 5. Thermal performance of layers of «standard» roof construction

№ п/п	Материал	Толщина слоя δ , м	Плотность материала ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ_B , Вт/(м ² ·°С)
1	Техноэласт ЭКП	0,0042	1260	0,22
2	Унифлекс ВЕНТ ЭПВ	0,003	1200	0,22
3	Армированная ЦПС	0,05	1800	0,93
4	Уклонообразующий слой из керамзитового гравия	0,04	600	0,19
5	Разделительный слой из рубероида	0,0005	600	0,17
6	Минераловатный утеплитель ТЕХНОРУФ Н ПРОФ	0,08	120	0,041
7	Минераловатный утеплитель мягкий	0,1	60	0,044
8	Железобетонная плита	0,2	2500	2,04

Стоит отметить, что конструкция стандартной кровли выбиралась из учета возможности использования для высотного здания.

По формулам (2) и (5) определяем общее и нормируемое сопротивление теплопередаче для «стандартного» кровельного покрытия:

$$R_0 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,0042}{0,22} + \frac{0,003}{0,22} + \frac{0,05}{0,93} + \frac{0,04}{0,19} + \frac{0,0005}{0,17} + \frac{0,08}{0,041} + \frac{0,1}{0,044} + \frac{0,2}{2,04} + \frac{1}{23} = 4,78 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт}$$

$$R_0^{\text{норм}} = R_0^{\text{тп}} = 0,0004 \cdot 4262,2 + 1,6 = 3,305 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт}$$

Как видно из полученных значений, «стандартная» кровля также удовлетворяет требованиям по сопротивлению теплопередаче $R_0^{\text{норм}} < R_0$. Но стоит отметить, что приведённое сопротивление «зеленой кровли» практически в 1,5 раза выше, чем у «стандартного» кровельного покрытия. Это дает право утверждать, что «зеленая кровля» обладает высокими показателями по теплоизоляции.

По описанной выше методике и приведенным формулам (2) и (5) были найдены требуемые и расчетные сопротивления теплопередаче для всех ограждающих конструкций бизнес-центра. Полученные результаты сведены в табл.6.

Таблица 6. Требуемые и расчетные сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций
 Table 6. Required and design resistance to heat transfer of enclosing structures

№ п/п	Тип наружной ограждающей конструкции	Требуемое сопротивление теплопередаче $R_i^{\text{тп}}$, (м ² ·°С)/Вт	Расчетное сопротивление теплопередаче R_i , (м ² ·°С)/Вт
1	Наружные стены		
1.1	Вентилируемый фасад – A_{c1}	2,48	3,44
1.2	Стекло-прозрачный фасад – A_{c2}	0,41	0,69
2	Окна, двери на эксплуатируемые кровли – A_o	0,41	1,1
3	Входные наружные двери		
3.1	стекло-прозрачные – A_{d1}	0,25	0,4
3.2	металлические – A_{d2}	1,48	1,1
4	Покрытие (зеленая кровля) – A_k	3,305	7,08
4.1	Покрытие (типовая кровля) – A_k	3,305	4,78
5	Перекрытие над неотапливаемым подвалом – $A_{п}$	2,79	2,15
6	Полы по грунту – $A_{пол}$	3,305	7,11
6.1	Стены заглубленных помещений – A_{c3}	2,47	3,60

РАСЧЕТ ГОДОВОГО РАСХОДА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Расчет расхода тепловой энергии производится для здания бизнес-центра в первом случае с кровельной конструкцией «зеленая кровля», во втором случае - со «стандартным» кровельным покрытием. Для обоих случаев расчета приняты следующие допущения:

– строительный объем здания, ориентация фасадов по сторонам света и расчетное количество людей, находящихся в бизнес-центре - неизменны;

– воздухообмен и системы вентиляции для здания со «стандартной» и «зеленой кровлей» - одинаковые.

Согласно всем перечисленным и принятым факторам величины бытовых и солнечных теплопоступлений, а также инфильтрационные затраты на отопление будут одинаковыми, поэтому сравнение затрат тепловой энергии на отопление произведем только по показателям потерь тепловой энергии здания через ограждающие конструкции.

Расчет трансмиссионных потерь тепловой энергии на отопление здания бизнес-центра производится согласно прил. Г и прил. Ж СП 50.13330.2012 по формуле (7):

$$Q_{от}^{год} = 0,024 \cdot ГСОП \cdot \sum_i \left(\frac{A_i}{R_i} \cdot n \right) \quad (7)$$

где $Q_{от}^{год}$ – трансмиссионные потери тепловой энергии на отопление, кВт·ч/год;

0,024 – переводной коэффициент потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции из Вт·сут в кВт·ч (1 сут = 24 ч, 1Вт = 0,001 кВт, 1 Вт·сут = 0,024 кВт·ч);

A_i – площадь соответствующего фрагмента (i-го типа) наружной ограждающей конструкции, м;

R_i – приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента (i-го типа) наружной ограждающей конструкции, (м²·°C)/Вт;

n – коэффициент, учитывающий зависимость положения наружной поверхности ограждающих конструкций (стен, окон, покрытия и т.п.) по отношению к наружному воздуху (для наружных стен, окон, дверей на эксплуатируемую кровлю, совмещенного покрытия, перекрытий над проездами коэффициент n принимается равным 1).

Согласно СП 50.13330.2012 для помещений, в которых отличается внутренняя или наружная температура от принятых в расчете ГСОП, коэффициент n определяется по формуле (8):

$$n = \frac{t_{в}^* - t_{от}^*}{t_{в} - t_{от}} \quad (8)$$

где $t_{в}^*$, $t_{от}^*$ – средняя температура внутреннего и наружного воздуха для данного помещения, °C;

$t_{от}$ – средняя температура наружного воздуха, °C;

$t_{в}$ – расчетная температура внутреннего воздуха здания, °C.

По проекту подвальные помещения не отапливаются, поэтому они не входят в отапливаемый объем здания. В среднем за отопительный период температура воздуха в подвале составляет 8 °C.

Тогда коэффициент, учитывающий отличие внутренней температуры подвала от температуры наружного воздуха, по формуле (8) составляет:

$$n = \frac{t_{в} - t_{под}}{t_{в} - t_{от}} = \frac{19 - 8}{19 - (-1,2)} = 0,544$$

По формуле (7) рассчитаем потери тепловой энергии через ограждающие конструкции за отопительный период для высотного здания бизнес-центра с применением технологии «зеленая кровля» и для этого же здания со «стандартным» кровельным покрытием.

Для бизнес-центра с «зеленой кровлей»:

$$Q_{от1}^{год} = 0,024 \cdot ГСОП \cdot \left(\frac{4090,77}{3,44} + \frac{12645,80}{0,69} + \frac{1837,50}{1,1} + \frac{34,02}{0,4} + \frac{3,78}{1,1} + \frac{1475,44}{7,08} + \frac{1770,22}{2,15} + \frac{1845,00}{7,11} \cdot 0,544 + \frac{1438,77}{3,60} \cdot 0,544 \right) = 2318537,60 \text{ (кВт} \cdot \text{ч/год)}$$

Для бизнес-центра со «стандартной» кровлей:

$$Q_{от2}^{год} = 0,024 \cdot ГСОП \cdot \left(\frac{4090,77}{3,44} + \frac{12645,80}{0,69} + \frac{1837,50}{1,1} + \frac{34,02}{0,4} + \frac{3,78}{1,1} + \frac{1475,44}{4,78} + \frac{1770,22}{2,15} + \frac{1845,00}{7,11} \cdot 0,544 + \frac{1438,77}{3,60} \cdot 0,544 \right) = 2328794,91 \text{ (кВт} \cdot \text{ч/год)}$$

Разница расходов тепловой энергии на отопление здания с двумя различными покрытиями составляет:

$$Q_{от}^{год} = Q_{от2}^{год} - Q_{от1}^{год} = 2328794,91 - 2318537,6 = 10257,31 \text{ (кВт} \cdot \text{ч/год)} = 8,82 \text{ Гкал/год.}$$

Для перевода из кВт·ч/год в Гкал/год используется коэффициент пересчета:

$$1 \text{ (кВт} \cdot \text{ч/год)} = 86 \cdot 10^{-5} \text{ Гкал/год.}$$

Сравним экономические затраты на отопление высотного здания бизнес-центра с ранее описанными типами кровельных конструкций. В соответствии с Распоряжение Комитета по тарифам Санкт-Петербурга от 20.12.2021 № 221-р, стоимость 1 Гкал (на 1 полугодие 2022) для Санкт-Петербурга равна 1784,87 руб. Путем умножения данной величины на годовые потери тепловой энергии,

рассчитанные в течение одного отопительного периода, получим экономические затраты на отопление. Результаты расчета годовых затрат тепловой энергии приведены в табл.7.

Таблица 7. Годовые затраты тепловой энергии за отопительный период
 Table 7. Annual costs of heat energy for the heating period

№ п/п	Наружные ограждающие конструкции здания	Годовой расход тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции, $Q_{от}^{год}$		Затраты тепловой энергии на отопление здания руб./год
		кВт·ч/год	Гкал/год	
1	Бизнес-центр с применением «Зеленой кровли»	2318537,60	1993,94	3558927,86
2	Бизнес-центр с применением типовой кровли	2328794,91	2002,76	3574672,70
	Разница результатов	10257,31	8,82	15744,84

Проанализировав полученные результаты годовых расходов $Q_{от1}^{год}$ и затраты на отопление тепловой энергии из табл.7 отметим, что использование технологии «зеленая» кровля не только сокращает расход тепловой энергии за один отопительный период, но и уменьшает экономические расходы на отопление.

Для рассматриваемого высотного здания бизнес-центра экономические затраты на отопление при «стандартном» кровельном покрытии превышают затраты на использование технологии «зеленая кровля» на 15744,84 руб.

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ «ЗЕЛЕНАЯ КРОВЛЯ» В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Для анализа целесообразности применения технологии «зеленая кровля» помимо высотного бизнес-центра рассмотрим здание химико-биологической школы на 408 учеников при следующих допущениях:

- наружные решения ограждающих конструкций, применяемые в здании школы аналогичны ограждающим конструкциям бизнес-центра;
- сравнение энергоэффективности происходит за счет замены «стандартного» покрытия на «зеленую кровлю»; покрытия «стандартной» и «зеленой» кровли аналогичны применяемым в бизнес-центре и имеют те же значения расчетного сопротивления теплопередаче;
- расчет затрат тепловой энергии на отопление производится только по показателям тепловых потерь через ограждающие конструкции;
- здание располагается в г. Санкт-Петербург.

Для начала определим площадь наружных ограждающих конструкций школы и рассчитаем сопротивление теплопередаче (табл.8).

Таблица 8. Площадь наружных ограждающих конструкций школы и расчетное сопротивление теплопередаче
 Table 8. The area of the outer enclosing structures of the school and the design resistance to heat transfer

№ п/п	Тип наружной ограждающей конструкции	Площадь конструкции, A_i , м ²	Расчетное сопротивление теплопередаче R_i , (м ² ·°C)/Вт
1	Наружные стены: вентилируемый фасад – A_{c1}	4913,3	3,44
2	Окна – A_o	1055,7	1,1
3	Входные наружные двери металлические – $A_{д2}$	46,20	1,1
4	Покрытие «стандартное» – A_k	5579,38	4,78
5	Перекрытие над неотапливаемым подвалом – A_p	5458,12	2,15
6	Полы по грунту – $A_{пол}$	5458,12	7,11
6.1	Стены заглубленных помещений – $A_{сз}$	1798,54	3,60
7	Общая площадь ограждающих конструкций – $A_{ок}^{сум}$	24309,36	-

Далее рассчитаем потери тепловой энергии через ограждающие конструкции за отопительный период согласно формуле (7) для школы с применением технологии «зеленая кровля» и для этого же здания со «стандартным» кровельным покрытием. Расчеты сведем в табл.9.

Таблица 8. Годовые затраты тепловой энергии за отопительный период
 Table 8. Annual costs of heat energy for the heating period

№ п/п	Наружные ограждающие конструкции здания	Годовой расход тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции, $Q_{от}^{год}$		Затраты тепловой энергии на отопление здания руб./год
		кВт·ч/год	Гкал/год	
1	Школа с применением «Зеленой кровли»	659390,79	567,08	1012157,08
2	Школа с применением типовой кровли	698178,82	600,43	1071696,25
	Разница результатов	38788,03	33,36	59539,16

На основании произведенного расчета, можно сделать вывод что использование «зеленой кровли» для здания химико-биологической школы сократит затраты на отопление на 59539,16 руб./год. Данная выгода напрямую связана с площадью кровельного покрытия. Как правило, основными источниками теплопотерь являются стены и кровля здания. Поэтому при анализе влияния площади покрытия на энергоэффективность зданий будем учитывать отношение площади покрытий кровли к площади ограждающих стен.

Согласно значениям, представленным в табл.8, наблюдается превышение площади кровельного покрытия школы над площадью стен практически в 1,2 раза, в то время как площадь кровли бизнес-центра в 11,3 раза меньше площади наружных ограждающих конструкций (табл.9).

Таблица 9. Сопоставление затрат на отопление в зависимости от отношения площади покрытия к площади ограждающих стен
 Table 9. Comparison of heating costs depending on the ratio of the coverage area to the area of the enclosing walls

№ п/п	Наружные ограждающие конструкции здания	Площади покрытия	Площадь ограждающих стен	Отношение площади покрытия к площади ограждающих стен, γ	Уменьшение затрат тепловой энергии на отопление здания
		м ²	м ²	м ²	руб./год
1	Бизнес-центр с применением «зеленой кровли»	1475,44	16736,57	0,088	15744,84
2	Школа с применением «зеленой кровли»	5579,38	4913,3	1,136	59539,16

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что экономическая выгода применения технологии зеленая кровля, зависит от площади покрытия: чем больше значение отношения площади кровли к площади ограждающих стен, тем меньше затрат на отопление здания (рис.1).

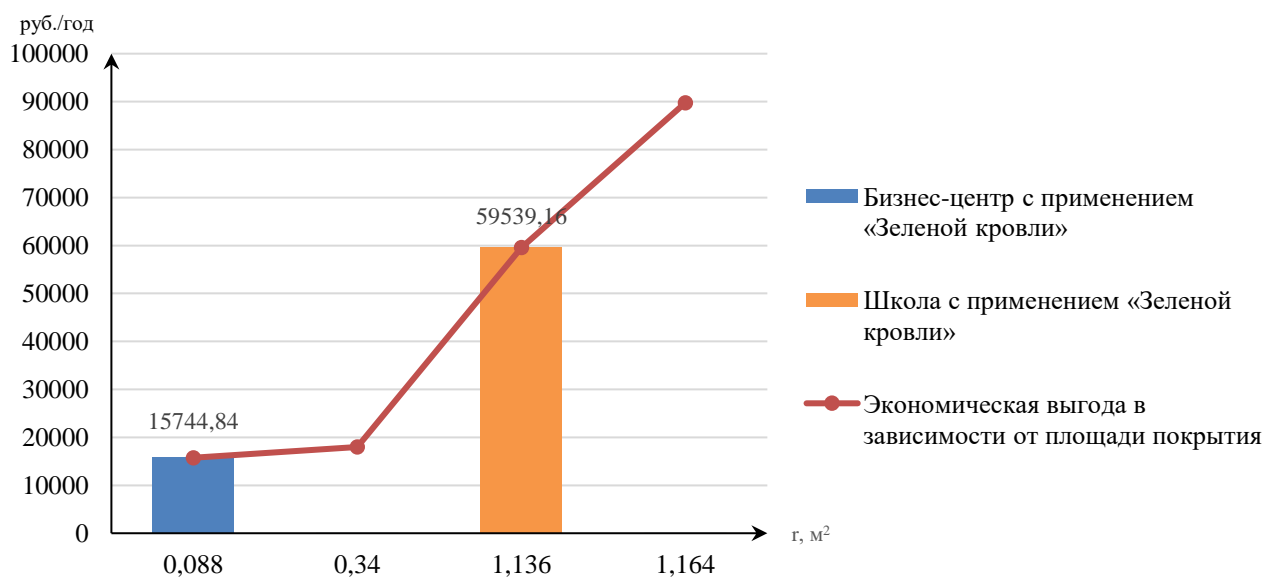


Рис. 1. Экономическая выгода на отопление зданий в зависимости от отношения площади покрытия к площади ограждающих стен

Fig. 1. Benefits for heating buildings depending on the ratio of the coverage area to the area of the enclosing walls

Приведенная диаграмма наглядно доказывает, что наиболее выгодными зданиями и сооружениями для применения технологии озеленения кровель являются строения, в которых площадь кровельных покрытий больше площади ограждающих стен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что «зеленая кровля» обладает целым рядом преимуществ, но ключевыми и более значимыми являются энергоэффективность и экологичность. За счет толщины и теплотехнических показателей «пирога» кровли, озеленённое кровельное покрытие снижает теплопотери через внешние ограждающие покрытия, а значит и сокращает затраты на охлаждение и отопление, тем самым увеличивая энергоэффективность здания.

По результатам оценки энергоэффективности применения технологии «зеленая кровля» на примере высотного бизнес-центра можно сделать вывод о том, что данная конструкция уменьшает экономические затраты на отопление и сокращает расход тепловой энергии за один отопительный период за счет высокого сопротивления теплопередаче «зеленого» кровельного настила, который в 1,5 раза превышает сопротивление теплопередаче «стандартной» конструкции кровли.

Разница между «стандартной» кровельной конструкцией и «зеленой кровлей» в затратах на отопление составила 15744,84 руб., что с первого взгляда может показаться не столь существенным, но так как для расчетного примера было принято высотное здание, в котором площадь ограждающих светопрозрачных и вентилируемых конструкций с меньшим значением сопротивления теплопередаче превышает площадь кровельных покрытий практически в 11,3 раза, данное значение снижения экономических затрат немаловажно.

Также на примере теплотехнического расчета химико-биологической школы было доказано, что экономическая выгода напрямую зависит от отношения площади покрытия к площади ограждающих наружных стен. Экономическая выгода применения озеленения кровли для здания школы составила 59539,16 руб.

Таким образом, применение «зеленой кровли» способно в разы снизить теплопотери через ограждающие конструкции, улучшить экологическую ситуацию мегаполисов, повлиять на качество жизни людей [15-17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылова А.И. Экономическая целесообразность применения зеленых кровель при реконструкции зданий // AlfaBuild. 2017. № 2 (2). С. 18-22. EDN: YEYVFR
2. Король Е.А., Шушунова Н.С. Организационно-технологическое моделирование процессов устройства кровельных покрытий с модульной системой озеленения // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 2 (125). С. 250-261. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.250-261 EDN: YXZHRJ
3. Долотказина Н.С., Поташова М.Д. Экологичная архитектура. Региональные природные материалы в «зеленом» строительстве // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2017. № 1 (19). С. 18-24. EDN: YLIIWL
4. Донов Д.И., Терех М.Д. Ключевые показатели и методы оценки качества зеленой инфраструктуры городов России // В сборнике: неделя науки ИСИ. Сборник материалов Всероссийской конференции. 2022. С. 379-382. EDN: IOSXAW
5. Саматова В.М., Гамаюнова О.С. Энергетическая эффективность зданий с применением технологии «зеленая кровля» // Инженерные исследования. 2021. № 4 (4). С. 24-32. EDN: WFWTKM
6. Глазунова А.В. Экоархитектура и вертикальное озеленение // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2018. Т. 18. № 8. С. 69-73. EDN: YOTOSL
7. Гаевская З.А., Михайловская Л.А. Обзор современных программных средств автоматизации ранней стадии проектирования зданий // В сборнике: Строительство и реконструкция. Сборник научных статей 4-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. Курск, 2022. С. 245-253. DOI: 10.47581/2022/PGS-17/Mixailovskay.01 EDN: IABFLA
8. Ковалева А.А., Наумович Ю.И. Повышение энергоэффективности зданий при реконструкции // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2022. № 1. С. 129-132. EDN: RTHNNG
9. Демешева А.А., Городишенина А.Ю., Заводнова Е.Б. Энергоэффективность зданий с применением «зеленой кровли» // В сборнике: НЕДЕЛЯ НАУКИ ИСИ. Сборник материалов Всероссийской конференции. 2022. С. 174-176. EDN: DLRZPR
10. Гурбатов Р.И. Техничко-экономическое обоснование технологической многофункциональности крыш зданий повышенной этажности // Современные фундаментальные и прикладные исследования. 2018. № 4 (31). С. 14-19. EDN: MNXJYT
11. Скинкайте Ю.О., Василенко А.Н. Анализ и оценка экономической эффективности использования эксплуатируемых кровель // Студент и наука. 2019. № 1. С. 95-101. EDN: ZDJDBZ

12. Zubarev K., Gagarin V. Heat and moisture transfer in building enclosing structures // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Т. 247. С. 257-266. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1_26 EDN: HSLOOO

13. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Graphical method for determination of maximum wetting plane position in enclosing structures of buildings // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference «FarEastCon 2019». 2020. С. 022046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022046 EDN: МССАНН

14. Копылова А.И., Богомолова А.К., Немова Д.В. Энергетическая эффективность здания с применением технологии «зеленая кровля» // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 10 (49). С. 20-34. DOI: 10.18720/CUBS.49.2 EDN: YGHSJF

15. Маковецкая-Абрамова О.В., Некрасов Д.И., Лунева С.К. Новые технологии в решении экологических проблем мегаполиса // В сборнике: Инновационные технологии и вопросы обеспечения безопасности реальной экономики. Сборник научных трудов по итогам Всероссийской научно-практической конференции. Под редакцией Г.В. Лепеша, О.Д. Угольниковой, С.Ю. Александровой. 2020. С. 198-204. EDN: ЕРТІСН

16. Теличенко В.И., Бенуж А.А., Мочалов И.В., Богачев А.В. Апробация требований к устройству «зеленых» крыш в городской застройке // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 12-17. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.12-17 EDN: GDNKSH

17. Шушунова Н.С. Анализ технологических параметров при устройстве инверсионных кровельных покрытий с озеленением // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 3 (114). С. 349-355. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3.349-355 EDN: YWQSDU

ОБ АВТОРАХ

Валерия Маратовна Саматова – студентка бакалавриата. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: lera.samatova.20@gmail.com

Ольга Сергеевна Гамаюнова – к.т.н., доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: gamayunova_os@spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Valeria M. Samatova – bachelor's student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: lera.samatova.20@gmail.com

Olga S. Gamayunova – Ph.D., Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: gamayunova_os@spbstu.ru

УДК 693.9

КОНЦЕПЦИЯ МОДУЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ПРИМЕРЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

С.В. Шевцов¹, Н.С. Астафьева²

^{1,2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

Аннотация. Развитие технологии быстровозводимых зданий очень важно на сегодняшний день. Для районов, которые пострадали от стихийных бедствий, катастроф или военных действий, быстровозводимые модульные здания являются наилучшим выходом из тяжелого положения. Здания из легких металлических конструкций отличаются своей прочностью, надежностью и экономичностью. Благодаря легкости монтажа, срок строительства зданий из легких металлических конструкций сокращается. В статье приведена сравнительная характеристика легких металлических конструкций (ЛМК) и легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), рассмотрены технологии строительства зданий из ЛМК и ЛСТК. Отдельное внимание уделено преимуществам использования модулей-трансформеров при строительстве быстровозводимых зданий, а также способам монтажа модульных зданий различными видами кранов. Сделан вывод о том, что концепция модульного строительства из ЛМК (особенно, из ЛСТК) имеет ряд ограничений и позволяет строить здания ограниченной этажности.

Ключевые слова: модульное строительство, модульные конструкции, быстровозводимые здания, малоэтажное строительство, многоэтажные дома, легкие металлические конструкции, ЛМК, легкие стальные тонкостенные конструкции, ЛСТК.

Ссылка для цитирования: Шевцов С.В., Астафьева Н.С. Концепция модульного строительства на примере использования легких металлических конструкций // Инженерные исследования. 2022. №3 (8). С. 30-37. EDN: BGGOMA

THE CONCEPT OF MODULAR CONSTRUCTION ON THE EXAMPLE OF THE USE OF LIGHT METAL STRUCTURES

S.V. Shevtsov¹, N.S. Astafeva²

^{1,2} Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. The development of the technology of prefabricated buildings is very important today. For areas that have suffered from natural disasters or military operations, prefabricated modular buildings are the best way out of a difficult situation. Buildings made of light metal structures are distinguished by their strength, reliability and efficiency. Due to the ease of installation, the construction period of buildings from light metal structures is reduced. The article presents a comparative characteristic of light metal structures (LMS) and lightweight gauge steel structures (LGSS), considers the technologies for building buildings from LMS and LGSS. Special attention is paid to the advantages of using transformer modules in the construction of prefabricated buildings, as well as to the methods of mounting modular buildings with various types of cranes. It is concluded that the concept of modular construction from LMS (especially from LGSS) has a number of limitations and allows the construction of buildings with a limited number of storeys.

Keywords: modular construction, modular structures, prefabricated buildings, low-rise construction, multi-storey buildings, light metal structures, lightweight gauge steel structures, LGSS.

For citation: Shevtsov S.V., Astafeva N.S. The concept of modular construction on the example of the use of light metal structures // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.3 (8). Pp. 30-37. EDN: BGGOMA

ВВЕДЕНИЕ

Строительная технология с применением легких металлических конструкций (ЛМК) впервые появилась в Канаде в 1950 году. В России технология появилась в начале 2000-х годов. Государственные нормативы недостаточно жесткие, поэтому принято использовать европейские или международные стандарты, которые гарантируют прочность и качество каркаса. Здания из легких металлических конструкций относятся к быстровозводимым [1-3], возводятся по каркасной технологии. Такая технология позволяет возводить здания и сооружения любого назначения.

Появление технологии ЛМК было обусловлено потребностью в возведении большого количества малоэтажных зданий. На сегодняшний день здания из легких металлических конструкций активно возводят в США, Канаде, Европе, Японии и России. Доля построенных домов из легких металлических конструкций в разных странах стремительно растет. Например, спрос на ЛМК при строительстве малоэтажных зданий в Японии составляет около 15%, в США – 6%, а в Великобритании – 3%. В России¹ на использовании технологии строительства из легких металлических конструкций приходится всего 0,5%.

В настоящее время проблема проектирования, строительства и эксплуатации быстровозводимых зданий и сооружений чрезвычайно актуальна для России. Данной проблемой активно занимаются многочисленные отечественные исследователи, научные и проектные учреждения Минстроя, Минобороны, МЧС и других федеральных и территориальных ведомств. Авторами большого количества публикаций последних лет, касающихся развития быстровозводимых конструкций, являются: Рыбаков В.А., Назмеева Т.В., Жмарин Е.Н., Сычев С.А., Александров С.Е., Аль Хаснави Я.С., Безбородов Е.Л., Харламов И.В., Корсун Н.Д. и др. [4-10]. Авторы исследуют возможность использовать быстровозводимые здания в северных климатических районах, огнезащиту деревянных и металлических конструкций быстровозводимых зданий, модульное строительство, технико-экономические показатели быстровозводимых конструкций и их энергоэффективность, перспективы внедрения информационного моделирования в модульном строительстве и пр. По мнению большинства исследователей, широкое применение быстровозводимых зданий и сооружений в России сдерживается отсутствием норм по их расчету и проектированию [11].

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛМК И ЛСТК

Лёгкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) - строительные конструкции из тонкой стали, применяемые для строительства быстровозводимых зданий. На первый взгляд кажется, что значимого отличия между ЛМК и ЛСТК нет. Но при изготовлении этих конструкций используется разный материал, также есть отличие в толщине деталей, вследствие чего каждая из технологий находит свое применение (табл.1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика ЛМК и ЛСТК²

Table 1. Comparative characteristics of light metal structures and lightweight gauge steel structures

Характеристика	Легкие металлические конструкции (ЛМК)	Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК)
Материал	черный металлопроката толщиной 8-40 мм	оцинкованная сталь толщиной 0,7-4 мм
Способ соединения элементов	соединяются сваркой или болтами	с помощью высокопрочных саморезов
Основная сфера применения	производственные помещения, большепролетные здания, высотные строения, крупные торговые центры	сельскохозяйственные постройки, ангары, малоэтажное строительство, торговые помещения, склады
Срок службы	более 50 лет	35-40 лет
Преимущества	– легкость материала; – скорость монтажа; – доступность; – мобильность готового изделия.	– высочайшая прочность; – сейсмическая устойчивость; – качество сырья; – неограниченная высота здания.

¹ Надежная легкость. Технологии ЛСТК в малоэтажном домостроении [Электронный ресурс]. – URL: <https://ardexpert.ru/article/9868> (дата обращения: 23.08.2022)

² В чем отличие между ЛСТК и ЛМК конструкциями? [Электронный ресурс]. – URL: <https://lmk-stroy.ru/otlichie-lstk-i-lmk-konstruktsii> (дата обращения: 05.08.2022)

ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ИЗ ЛСТК

На сегодняшний день используются три вида технологий монтажа из ЛСТК:

1. *Поэлементный монтаж*, когда элементы каркаса доставляются на строительную площадку и собираются как конструктор «с нуля» (рис.1).

2. *Производство целой панели в заводских условиях*. Панель включает в себя окна, инженерные коммуникации, внутреннюю и внешнюю отделку (при необходимости). В таком виде доставляется на строительную площадку.

3. *Объемно-блочная технология*, при которой готовые модули с чистовой отделкой и разведенными коммуникациями полностью собираются в производственных цехах. Потом их привозят на стройплощадку и соединяют друг с другом. Такая технология довольно удобная в использовании, так как основной процесс выполняется вне строительной площадки, что существенно экономит время строительства.



Рис. 1 Здание из ЛСТК³
Fig. 1. Building from , LGSS



Рис. 2. Процесс строительства здания из ЛСТК⁴
Fig. 2. The process of building a building from , LGSS

В технологии ЛСТК используются следующие виды соединений:

– *Клеевые*. Основные преимущества – защита от коррозии в местах соединения, малый вес элементов, равномерное распределение напряжений. Недостаток – высокие требования к клеевому составу.

– *Сварные*. Особенность - малая трудоемкость и хорошая герметичность. Недостаток - дефекты швов.

– *Винтовые*. Преимущество – простой и быстрый способ монтажа. Недостаток - повреждение конструкций при демонтаже.

– *Болтовые*. Отличаются от других видов высокой прочностью и надежностью, но за этим стоит большая трудоемкость и высокая стоимость.

– *Заклепочные*. Преимущество - высокая прочность. Недостаток – требуется детальная разработка нормативной базы в России.

С помощью технологии ЛСТК производится практически треть каркасных домов в зарубежных странах. Технология пользуется спросом из-за высокой скорости монтажа, что является трендом современного строительства. Однако многие ученые, строители и архитекторы скептически настроены к использованию металлических каркасов, объясняя это тем, что такие конструкции не способны противостоять очень низким температурам, что может повлечь за собой различные деформации.

В России к такой технологии долгое время относились настороженно из-за убеждения, что такая конструкция не способна выдержать низкие температуры и атмосферные осадки. Поэтому в последнее время применяли такую технологию только для строительства малоэтажных зданий.

Однако в 2014 г. компания Андромета приняла решение построить шестиэтажный ЛСТК дом в Калуге (рис.2). Компания создала фирменную технологию строительства ЛСТК и назвала ее СТИЛТАУН®.

Элементы каркаса здания транспортируются на строительную площадку, затем начинается процесс монтажа с помощью резьбовых креплений, без сварки и других трудоемких технологий. Обшивка каркаса выполняется на обычные шурупы. В качестве обшивки можно использовать любой плитный материал с подходящей огнестойкостью.

³ Утепление дома из ЛСТК [Электронный ресурс]. – URL: <https://ekovata-msk.ru/uslugi/uteplenie-doma-iz-lstk/> (дата обращения: 05.09.2022)

⁴ Конструктивные особенности зданий серии СТИЛТАУН® [Электронный ресурс]. – URL: <https://andrometa.ru/blog/zhilye-zdaniya/konstruktivnye-osobennosti-zdaniy-serii-stiltaun/> (дата обращения: 10.09.2022)

Между внутренней и внешней частью плиты укладывается теплоизоляция. В малоэтажных зданиях обычно в качестве утеплителя используют плиты из огнестойкой минеральной ваты. В зависимости от высоты здания может применяться ячеистый пенобетон, который изолирует внутреннюю часть и укрепляет несущую конструкцию.

Отделочные работы здания по технологии СТИЛТАУН® отличаются своей низкой стоимостью, т.к. облицовка осуществляется на почти идеально ровных участках. По этой технологии можно пропустить этапы устройства стяжки и выполнения черновой отделки, и сразу начать чистовую облицовку. Благодаря такой особенности отделка здания выйдет на треть дешевле, чем при таких же работах в традиционном строительстве зданий. В табл.2 представлен сравнительный анализ традиционных технологий строительства и технологии ЛСТК СТИЛТАУН®.

Таблица 2. Сравнительный анализ⁵ традиционных технологий строительства и технологии ЛСТК СТИЛТАУН®
 Table 2. Comparative analysis of traditional construction technologies and , LGSS technology STEELTOWN

Средний показатель	СТИЛТАУН	Кирпич	Монолит-бетон	Панельный дом
Срок строительства 6-этажного здания, мес.	4-6	10-12	8-10	6-8
Соотношение стоимости «коробки»	1	2	1,5	1,2
Соотношение стоимости отделочных работ	1	1,5	1,5	1,5
Соотношение приведенных трудозатрат	1	2	1,5	1,2
Соотношение энергозатрат на отопление	1	1,5	1,5	2,5
Масса строительных отходов при норме 200÷300 кг/кв.м	8,5	300	240	155

ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ИЗ ЛМК

Быстровозводимые здания ЛМК – жилые и промышленные сооружения, каркас которых выполнен из профилей тонколистовой стали, которая является широко доступным строительным материалом и специализированных заводах. В табл.3 представлен сравнительный анализ по физическим параметрам, экономическим и трудовым технологии ЛМК, модульной конструкции и SIP-панелей.

Таблица 3. Сравнительный анализ технологии ЛМК, модульной конструкции и SIP-панелей
 Table 3. Comparative Analysis of Light Metal Structure Technology, Modular Design and SIP Panels

Параметр	Технология строительства быстровозводимых зданий		
	ЛМК	Модульная конструкция	SIP панели
Регион строительства	Любой регион	Любой регион	Любой регион
Наличие дополнительных работ перед внутренней чистовой отделкой	Обшивка ГКЛ	Не требуется	Оштукатуривание и грунтование стен
Возможность изменения геометрических характеристик, свойств несущих конструкций	отсутствует	отсутствует	отсутствует
Огнестойкость	0,5 - 2,5 ч	IV	K3
Наличие горючих материалов	отсутствует	отсутствует	Пенополистирол относится к нормальному горючему
Вес конструкции	40-50 кг при толщине 150-200 мм	Масса пустого модуля – 4000кг	45-95 кг/м ²
Сезонность	внесезонно	внесезонно	внесезонно
Продолжительность сборки	4-5 месяцев	30-40 минут для модуля	2-3 месяца
Срок службы	около 20	20	50-80
Скорость монтажа 100 м ²	2-3 мес.	30 минут один модуль	1-1,5
Потребность в кране	В зависимости от этажности	Автомобильный кран	В зависимости от этажности
Необходимость сварки	Монтаж стыков ЛСТК крепежными элементами	Соединение модулей крепежными элементами	Соединение модулей крепежными элементами
Стоимость монтажа за м ²	От 8000	От 1500	1000-2000

⁵ Технология ЛСТК СТИЛТАУН® [Электронный ресурс]. – URL: <https://andrometa.ru/steeltown-technology> (дата обращения: 12.09.2022)

Сравнение технологий показало, что каждая технология имеет свои ключевые особенности. Так, например, технология SIP-панелей лидирует по сроку службы и стоимости монтажа. Монтаж блок-модуля занимает меньше времени, чем у трансформационных модулей. В блок-модулях заводской готовности уже предусмотрена чистовая отделка и инженерные коммуникации. Производство одного модуля, без учета отделочных работ, 2-3 дня. Монтаж модуля на заранее подготовленную поверхность – 30-40 минут.

Возможность строительства модульных конструкций и нормальной эксплуатации предусмотрены в любом регионе России. Однако часто транспортные расходы и доставка в труднодоступные районы обременительны для застройщика, поэтому приоритет отдается традиционному, иногда более длительному, строительству.

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДУЛЕЙ-ТРАНСФОРМЕРОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ БЫСТРОВЗВОДИМЫХ ЗДАНИЙ

Основа модульной конструкции - металлический каркас, который с внутренней стороны обшивается конструкционной доской, а сверху материалом по желанию заказчика. Между ними прокладывается специальный теплоизоляционный материал, так как данные дома предназначены для постоянного проживания даже в суровом холодном климате и при этом не затрачивают много энергии на внутреннее отопление. В качестве теплоизоляции, как правило, используется минеральная вата, а в качестве кровли при строительстве модульных домов применяются листы оцинкованного металла или специальная черепица [12].

Блок-модули удобно использовать для любого вида строительства. На сегодняшний день строительство быстровозводимых зданий особенно актуально в местах разрушений зданий от стихийных бедствий, а также в условиях военных действий. Модули легко транспортируются с помощью автомобильного и железнодорожного транспорта, прицепом, полуприцепом. На одной железнодорожной платформе можно транспортировать до 4 модулей в собранном виде. Готовые модули доставляются на строительную площадку даже с отделкой и инженерными коммуникациями. Единственное, что необходимо сделать – закрепить их между собой. На рис.3 представлен пример модульной конструкции - модель ВДПО-V4 (вагон-дом переменного объема).



Рис. 3. Пример модульной конструкции; модель ВДПО-V4⁶

Fig. 3. Example of a modular design VDPO-V4

Технология позволяет собрать одно здание силами 3-5 человек в течение 30-40 минут. Такая конструкция идеально подойдет для ускоренного строительства.

Так как данная технология относится к складывающейся системе стоит отметить такие особенности, как малый транспортный объем, заводская готовность, увеличение объема при трансформации, простота монтажа.

Среди этих достоинств ярко выражены и недостатки в виде отсутствия роста в вертикальной плоскости, это значит, что возведение возможно только в малоэтажном формате. Низкие эстетические качества, простота планировочных решений.

Процесс монтажа одноэтажного блок-модульного здания со встроенной крышей представлена на рис.4.

⁶ Блок-трансформеры [Электронный ресурс]. – URL: <https://tsk38.ru/modulnye-zdaniya/blok-transformery/> (дата обращения: 15.09.2022)

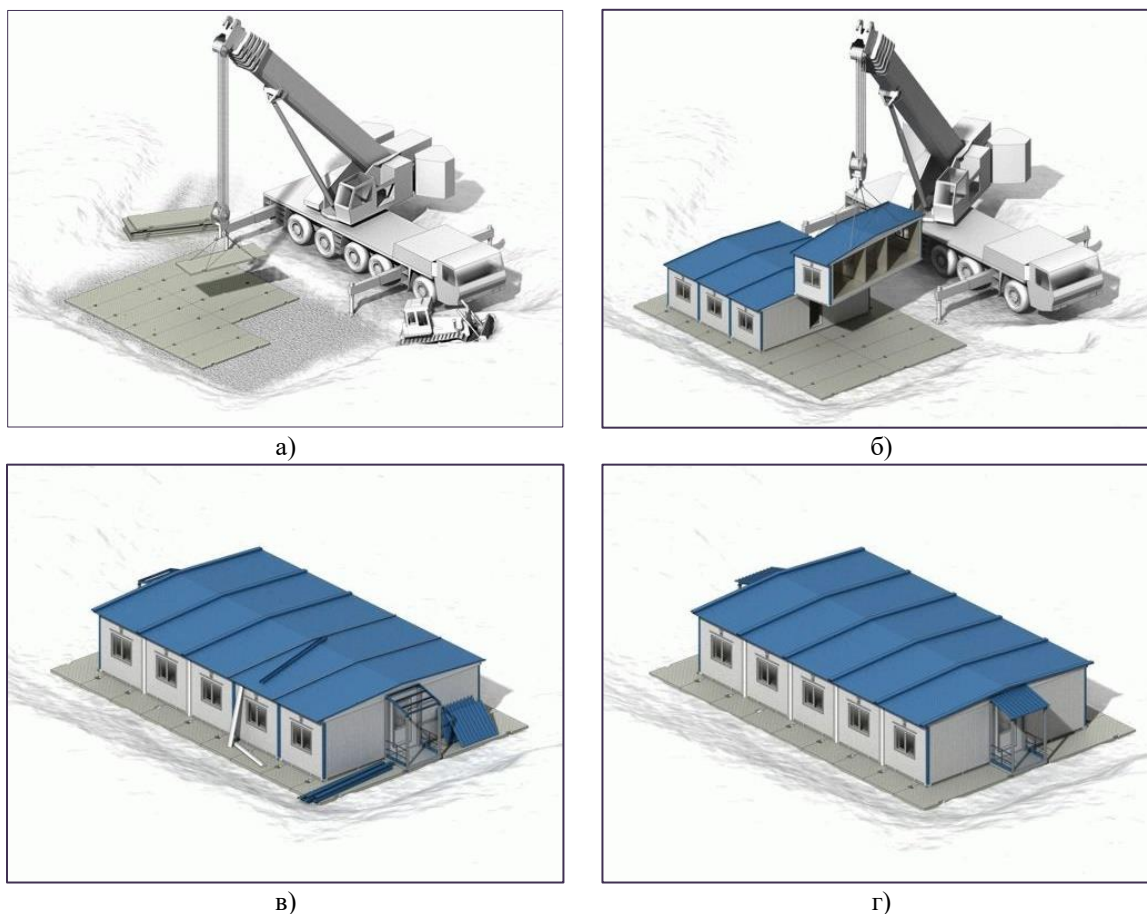


Рис. 4. Процесс монтажа одноэтажного блок-модульного здания со встроенной крышей⁷
Fig. 4. The installation process of a one-story block-modular building with a built-in roof

Процесс монтажа многоэтажного модульного здания представлен на рис.5.



Рис. 5. Процесс монтажа многоэтажного модульного здания⁸
Fig. 5. Installation process of a multi-storey modular building

⁷ Блочно-модульные здания [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.vagondoma.com/prefab/bystrovozvodimye-zdaniya-na-baze-blok-modulej.html> (дата обращения: 20.09.2022)

⁸ Изготовление бытовок вагончиков в Красноярске [Электронный ресурс]. – URL: <https://msib24.ru/> (дата обращения: 21.09.2022)

Альтернативный вариант монтажа модульных конструкций с помощью козлового крана представлен в работе [13] и показан на рис.6.

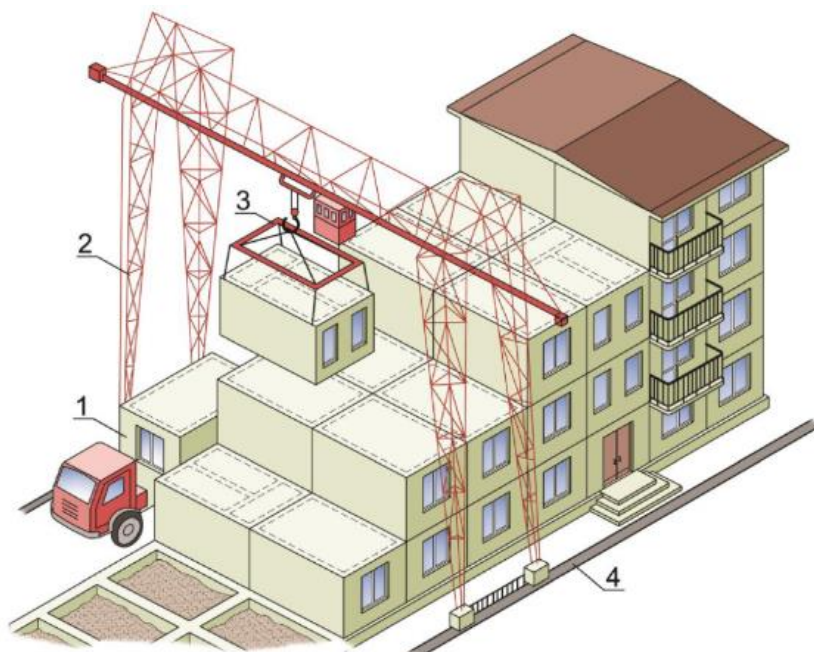


Рис. 6. Монтаж модульного здания с помощью козлового крана: 1 – блок на транспорте; 2 – козловой кран; 3 – траверса; 4 – подкрановый путь

Fig. 6. Installation of a modular building using a gantry crane: 1 - block on transport; 2 - gantry crane; 3 - traverse; 4 - crane runway

Выбор строительных машин и оборудования для монтажа модульных зданий зависит от высотности здания, характеристик (типов) модулей и других параметров. Для обоснования характеристик парка строительных машин рекомендуется использовать средства стохастического программирования и оптимизационного моделирования [14-17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие технологии быстровозводимых зданий очень важно на сегодняшний день. Для районов, которые пострадали от стихийных бедствий, катастроф или военных действий, быстровозводимые модульные здания являются наилучшим выходом из тяжелого положения. Модульные конструкции не уступают другим технологиям ни по качеству, ни по стоимости.

Основными преимуществами технологии модульного строительства являются высокая скорость монтажа, низкая стоимость строительства и экологичность использования. Строительство зданий из легких металлических конструкций играет важную роль, ведь они могут выполнять не только ограждающую функцию, но и несущую. Применение такой технологии позволит сократить сроки строительства и получить максимальный эффект от реализации проекта. При большей этажности ЛМК может применяться в качестве ограждающих конструкций. Однако технология является еще недостаточно развитой, имеет ряд ограничений и позволяет строить здания ограниченной этажности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мушинский А.Н., Зимин С.С. Строительство быстровозводимых зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 4 (31). С. 182-193. EDN: UISIEB
2. Николенко С.Д., Щиенко А.Н. Быстровозводимые здания и сооружения // Высокие технологии в строительном комплексе. 2021. № 2. С. 159-168. EDN: XYBYAY
3. Гамаюнова О.С., Радаев А.Е. Энергоаудит и энергоэффективность модульных военных городков // В сборнике: Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 25-26 сентября 2019. СПб: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2019. С. 63-67. EDN: DENVML
4. Лебедева М.С., Назмеева Т.В. Каркасные гражданские здания с ЛСТК ограждающими конструкциями // Инженерная наука. 2021. № 43-1 (219). С. 8-11. EDN: SDCTMX

5. Абдусаттархужа С.С., Назмеева Т.В. Преимущества технологии ЛСТК для сокращения расходов при возведении наземной инфраструктуры // В сборнике: Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 25-26 сентября 2019. СПб: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2019. С. 122-125. EDN: RKRGOP
6. Бондарь В.Т., Назмеева Т.В., Рыбаков В.А. Напряженно-деформированное состояние стойки из спаренных вложенных друг в друга профилей // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Сборник материалов Всероссийской конференции. Санкт-Петербург, 04-10 апреля 2022. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2022. С. 289-292. EDN: FTZQAU
7. Rybakov V.A., Ananeva I.A., Pichugin E.D. Heat protective properties of enclosure structure from thin-wall profiles with foamed concrete // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 2 (94). С. 11-20. DOI: 10.18720/MCE.94.2 EDN: ALOOKP
8. Орлова А.В., Жмарин Е.Н., Парамонов К.О. Энергетическая эффективность домов из ЛСТК // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 6 (11). С. 1-13. EDN: RADHST
9. Сычев С.А. Технология проектирования интерактивного проекта производства работ при возведении энергоэффективных зданий из модульных систем // В сборнике: BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 29-30 марта 2018. СПб: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 2018. С. 123-128. EDN: YUWZCU
10. Le T.Q.T., Vavilova A. A method of accounting for higher vibration modes in structural dynamics problems // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. T. 70. С. 479-490. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_42 EDN: IEKVBR
11. Зуева А.В. Быстровозводимые здания и модульное строительство // Молодой ученый. 2016. № 3(107). С. 100-103. EDN VKZLEX
12. Клевцова К.С. Инновационное модульное строительство // Молодой ученый. 2017. №3 (137). С. 103-105. EDN: XQZDIT
13. Сычев С.А. Технология высокоскоростного строительства малоэтажных зданий // В сборнике: Актуальные вопросы технических наук. Сборник материалов международной научной конференции. Киров, 2014. С. 71-76.
14. Павлова Н.Ю., Радаев А.Е. Обоснование характеристик парка строительных машин с использованием средств стохастического программирования // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Сборник материалов Всероссийской конференции. 2022. С. 440-443. EDN: OVXXUZ
15. Спицкая А.Ш., Радаев А.Е. Обоснование характеристик комплектов строительных машин с применением элементов теории систем массового обслуживания // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 198-200. EDN: EKEUTK
16. Ноздрачёва Ю.А., Пилипчук С.Ф., Радаев А.Е. Оптимизационная модель обоснования характеристик технологической группы подъемно-транспортного оборудования // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. С. 732-742. EDN: SMNKZB
17. Левенцов В.А., Радаев А.Е., Николаевский Н.Н. Аспекты концепции «Индустрия 4.0» в части проектирования производственных процессов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2017. Т. 10. № 1. С. 19-31. DOI: 10.18721/JE.10102 EDN: YGDCJP

ОБ АВТОРАХ

Сергей Викторович Шевцов – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: s3671187@yandex.ru

Наталья Серафимовна Астафьева - к.э.н., доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: astafieva_ns@spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Shevtsov – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: s3671187@yandex.ru

Natalia S. Astafeva – Ph.D., Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: astafieva_ns@spbstu.ru

УДК 691.5

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Г.А. Титов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. Аддитивная печать становится популярным направлением возведения зданий и сооружений с помощью строительных принтеров, позволяющих сократить сроки строительства, а также уменьшить трудозатраты за счет использования минимального количества ресурсов. Правильный подбор компонентов смеси позволяет развивать использование 3D-технологий в процессе строительства, а также в значительной мере расширять архитектурную вариативность. Технология 3D-печати, применительно к строительной отрасли, может рассматриваться как перспективная с точки зрения ее реализации при проектировании, строительстве, эксплуатации, реконструкции, то есть в период всех этапов строительного процесса. В статье приведено сравнение аддитивных и традиционных технологий, описаны виды материалов для аддитивной печати и их сфера применения, описаны виды 3D-печати (FDM, CJP, SLS, MJM, SLA), представлено одно из последних достижений в сфере аддитивных технологий - первый российский 3D-принтер для печати в условиях невесомости. Проведенный анализ современных тенденций научных исследований в сфере материалов для 3D-печати позволил сделать вывод, что особый интерес ученых представляет возможность использования отходов производства отечественных промышленных предприятий, добавок из растительных материалов, создание строительных смесей для использования при отрицательных температурах, повышение прочностных характеристик напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов, совместное использование 3D-печати и BIM-технологий.

Ключевые слова: 3D-печать, 3D-принтер, аддитивные технологии, строительные смеси, строительные материалы, WinSun, метод послойного экструдирования, древесные отходы, доменный шлак, Индустрия 4.0.

Ссылка для цитирования: Титов Г.А. Материалы для аддитивных технологий в строительстве // Инженерные исследования. 2022. №3 (8). С. 38-49. EDN: HJDIE

MATERIALS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

G.A. Titov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. Additive printing is becoming a popular way of constructing buildings and structures using construction printers, which can reduce construction time, as well as reduce labor costs by using a minimum amount of resources. The correct selection of the mixture components allows to develop the use of 3D technologies in the construction process, as well as to greatly expand the architectural variability. 3D printing technology, in relation to the construction industry, can be considered as promising in terms of its implementation in the design, construction, operation, reconstruction, that is, during all stages of the construction process. The article compares additive and traditional technologies, describes the types of materials for additive printing and their scope, describes the types of 3D printing (FDM, CJP, SLS, MJM, SLA), presents one of the latest achievements in the field of additive technologies - the first Russian 3D -printer for printing in weightless conditions. The analysis of modern trends in scientific research in the field of materials for 3D printing led to the conclusion that scientists are of particular interest in the possibility of using waste products from domestic industrial enterprises, additives from plant materials, creating building mixtures for use at low temperatures, improving the strength characteristics of printed on building materials. structural elements printer, sharing 3D printing and BIM technologies.

Keywords: 3D printing, 3D printer, additive technologies, building mixtures, building materials, WinSun, layer-by-layer extrusion, wood waste, blast-furnace slag, Industry 4.0.

For citation: Titov G.A. Materials for additive technologies in construction // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.3 (8). Pp. 38-49. EDN: HJDIE

ВВЕДЕНИЕ

Первые исследования по внедрению аддитивных технологий были направлены на изучение возможности эффективного применения сырья. Аддитивное производство позволяет уменьшить стоимость сырья за счет точного и нужного нанесения материала, а точность изготавливаемых изделий при этом повышается. Также снижается количество отходов в ходе строительного производства [1-5].

Аддитивные технологии (Additive Manufacturing – от слова аддитивность – прибавляемый) – это послойное наращивание и синтез объекта с помощью компьютерных 3D-технологий. Если при традиционном производстве изначально имеется заготовка, от которой в последствии отсекается все лишнее или она деформируется, то в случае с аддитивными технологиями из «ничего» (расходного материала) изготавливается новый объект.

Первопроходцем в этой технологии является Чарльз Халл (Charles Hull). В 1983 г. он спроектировал первый стереолитографический трехмерный принтер, который создавал 3D-модель посредством нанесения фотополимеризующегося материала на подвижную платформу. Основой служил заранее смоделированный на компьютере цифровой макет. 3D-принтер Чарльза Халла создавал трехмерные объекты, поднимаясь на 0,1-0,2 мм (высоту слоя). Первым 3D-печатным объектом стал небольшой пластиковый стакан [6]. Несмотря на то, что первый аппарат обладал множеством минусов, технология получила свое применение.

Одним из последних достижений в сфере аддитивных технологий стала разработка инженеров Томского политехнического университета (ТПУ) - первый российский 3D-принтер для печати в условиях невесомости. С его помощью российские космонавты смогут делать детали, необходимые для работы с оборудованием станции, чтобы их не пришлось доставлять с Земли. 3D-печать в невесомости отличается от земных условий. При печати на Земле гравитация вносит существенный вклад в «склеивание» слоев при послойном формировании детали. Отсутствие гравитации требует изменений и в технологии, и в конструкции принтера [7]



Рис. 1. Первый 3D-принтер SLA-1¹
Fig. 1. The first 3D printer SLA-1



Рис. 2. Первый российский 3D-принтер для работы в космосе [7]
Fig. 2. The first Russian 3D printer to work in space

Первые аддитивные системы производства работали с полимерными материалами. Сегодня 3D-принтеры способны работать также с инженерными пластиками, композитными порошками, разными типами металлов, керамикой, песком. Аддитивные технологии все больше используются в строительстве, машиностроении, промышленности, науке, образовании, проектировании, медицине, литейном производстве и многих других сферах.

Архитекторы и инженеры находят различные способы применения аддитивных технологий в строительстве, хотя такие технологии, как правило, используются для печати небольших объектов [1]. В строительной отрасли 3D-печать очень полезна для возведения сложных и уникальных сооружений, создания макетов для анализа прочности возводимых конструкций. Есть также и другие преимущества применения аддитивных технологий в строительстве, которые представлены на рис.3.

¹ 3D-принтер: что это и как он работает? [Электронный ресурс]. - URL: https://gb.ru/posts/how_3d_printing_works (дата обращения: 05.04.2022)

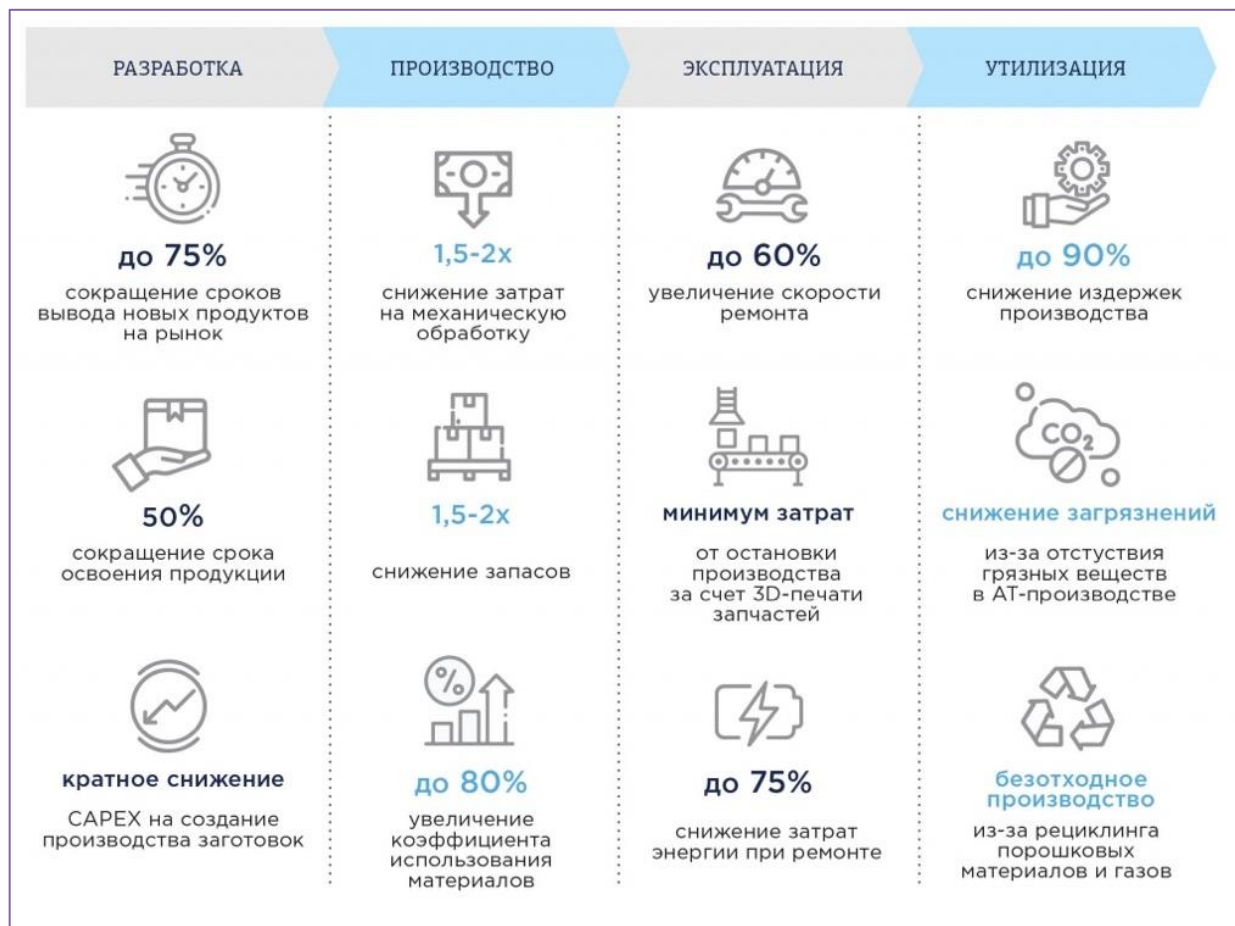


Рис. 3. Преимущества аддитивных технологий в строительстве²

Fig. 3. Advantages of additive technologies in construction

Отечественные предприятия с каждым годом все больше и больше используют системы 3D-печати в производственных и научных целях. Оборудование для аддитивного производства, грамотно внедренное в производственную цепочку, предоставляет возможность не только сократить издержки и сэкономить время, но и начать выполнять более непростые задачи.

Согласно отчету GlobalData, в настоящее время на долю рынка 3D-печати приходится менее 0,1% от общего мирового производственного рынка, который оценивается в 12,7 трлн долл [8]. Россию пока нельзя провозгласить лидером в данной сфере. Доля РФ составляет всего 2%, страна находится на 11 месте в мире по производству и внедрению АТ. Однако рынок 3D-печати в России за последние 8 лет вырос в 10 раз, совокупные продажи оборудования, материалов и услуг в области аддитивного производства (включая НИОКР) выросли до 4,5 млрд руб. в год. На закупку оборудования и материалов приходится около 80% объемов рынка. В целом, в настоящее время на российском рынке аддитивных технологий отечественное оборудование занимает порядка 42%, иностранное оборудование – около 60%. Таким образом, за последние годы в данной сфере снизилась импортозависимость с 96% до 60% [9].

СРАВНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ И ТРАДИЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аддитивные технологии – один из главных мировых трендов, который стоит на пороге новой (четвертой) промышленной революции, получившей название Индустрия 4.0. Технология 3D-печати, дополняя традиционное производство, имеет свои достоинства и недостатки. Одно из главных преимуществ – сокращение сроков производства. Схематично сравнение технологии традиционного и аддитивного производства представлено на рис.4.

² Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство [Электронный ресурс]. - URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tekhnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologiy-v-proizv/> (дата обращения: 11.04.2022)



Рис. 4. Процессы, ведущие к готовому продукту³
Fig. 4. Processes leading to the finished product

Схематично различия в традиционном и аддитивном производстве представлены на рис.5.

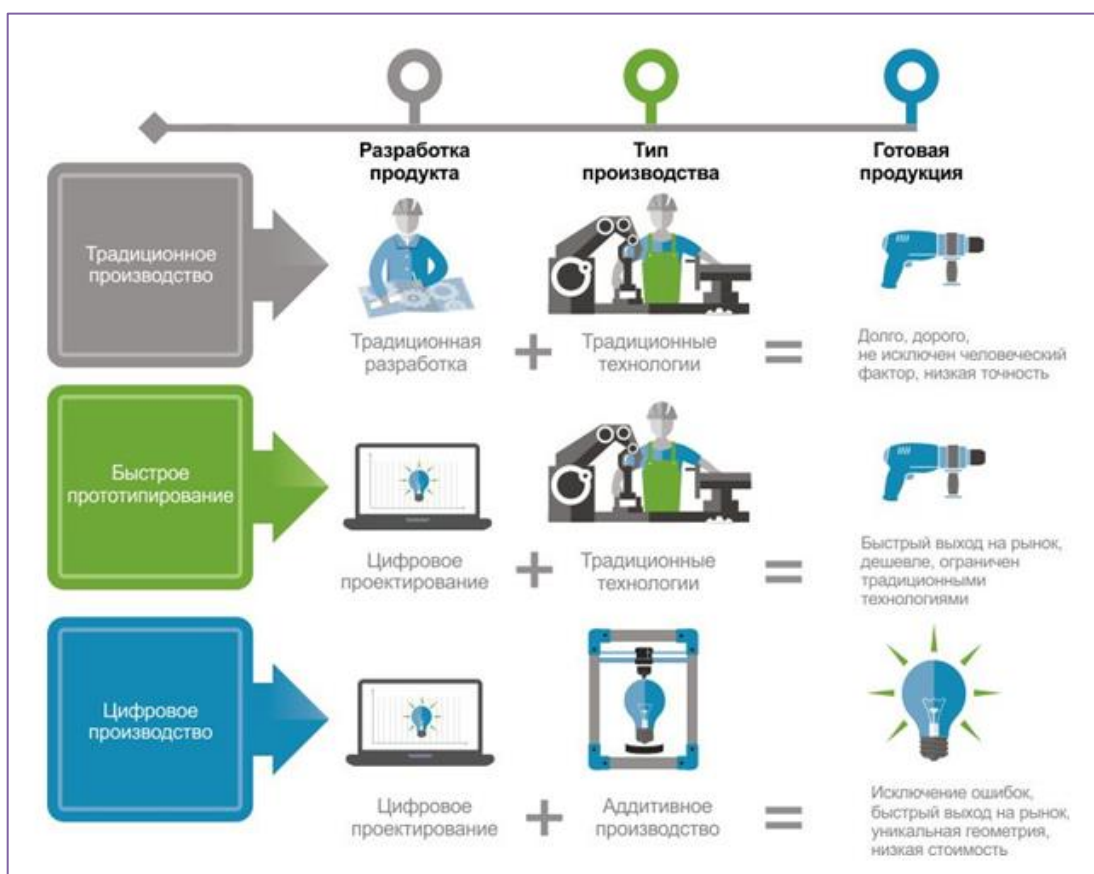


Рис. 5. Схема производств различного типа⁴
Fig. 5. Scheme of productions of various types

³ Суть и преимущества аддитивных технологий и производства [Электронный ресурс]. - URL: <https://top3dshop.ru/wiki/additive-technologies.html> (дата обращения: 13.04.2022)

⁴ Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство [Электронный ресурс]. - URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tekhnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologiy-v-proizv/> (дата обращения: 12.04.2022)

ВИДЫ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Основные материалы, которые используются в аддитивных процессах:

- термопластики в виде нитей или гранул;
- УФ- и фотоотверждаемые жидкие фотополимеры;
- керамонаполненные жидкие фотополимеры;
- полистирол в виде порошка;
- стеклонанполненные, угленанполненные и металлонанполненные полиамиды в виде порошка;
- воск;
- гипсовый порошок;
- металлические сплавы в виде порошка и др.

Состав используемой рабочей смеси является определяющим в корректном использовании технологии 3D-печати. Он должен обладать быстрым набором прочности, который мог бы обеспечить необходимую схватываемость между слоями, оказывающими нагрузки на нижележащие, без деформации. Для этого смесь должна иметь оптимальный предел текучести и, в то же время, быть довольно жидкой для экструзии. В основу оптимального компонентного состава должен быть положен быстротвердеющий бетон с включением различных добавок для улучшения его свойств [6].



Рис. 6. Пример 3D-печати, с помощью бетонной смеси [10]

Fig. 6. Example of 3D printing with concrete mix

Так же, как и в обычном бетоне, за основу берут вяжущие материалы: цемент, зола-унос, микрокремнезем, каолиновая глина и т.д. [11]. Но если в обычном бетоне в качестве заполнителей используют песок, щебень или гравий, то в бетоне для трехмерной печати, используют только песок различных фракций, армирование стеклянной или полипропиленовой фиброй, небольшое количество воды для схватывания. Неотъемлемой частью изготавливаемой смеси являются химические добавки, придающие бетону свойства, без которых не обойдется реализация печати (пластификаторы, ускорители или замедлители твердения, водоредуцирующие добавки и т.д.).

ВИДЫ 3D-ПЕЧАТИ

Динамически развивающиеся быстрыми темпами аддитивные технологии 3D-печати используются в прогрессивных производствах. Существует несколько инновационных видов аддитивных технологий.

FDM (Fused deposition modeling) – изделие формируется послойно из расплавленной пластиковой нити. Экструдер – печатающая головка, выдавливающая материал [10]. В данной технологии экструдер выдавливает расплавленный пластик в двумерной плоскости. После нанесения слоя экструдер поднимается и наносится второй слой, который соединяется с первым. Так, из тонкой нити пластика создается трехмерная фигура.

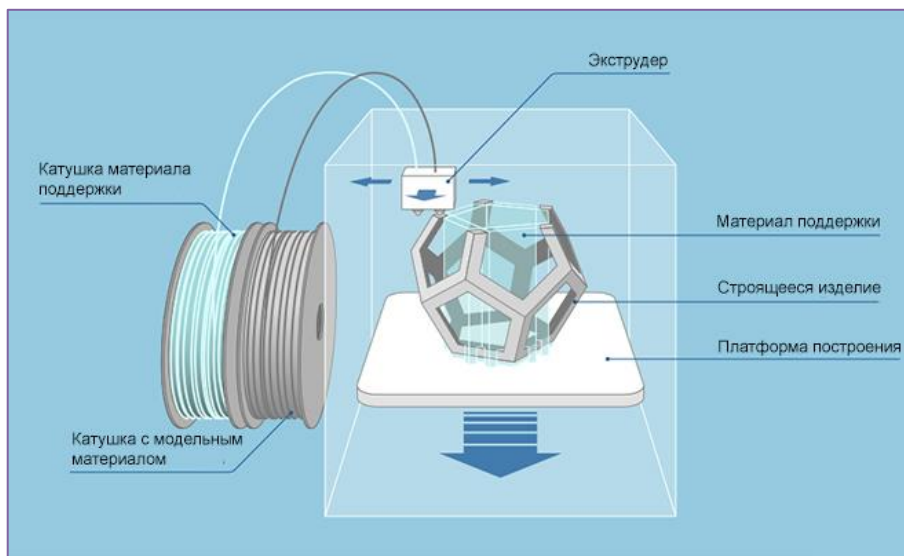


Рис. 7. Принцип работы FDM⁵
Fig. 7. Principle of operation FDM

CJP (ColorJet printing) – единственная в мире 3D полноцветная печать с принципом склеивания порошка, состоящего из гипса. Из порошкообразного материала – гипса, который может быть окрашен в различные цвета, получают послойно склеенные предметы. Порошок раскатывается по рабочей поверхности специальным роликом. Затем на данный слой наносится клеящий состав с помощью аналога печатающей головки. Состав может быть окрашен в разные цвета, а модель, созданная таким способом, разноцветная [10].

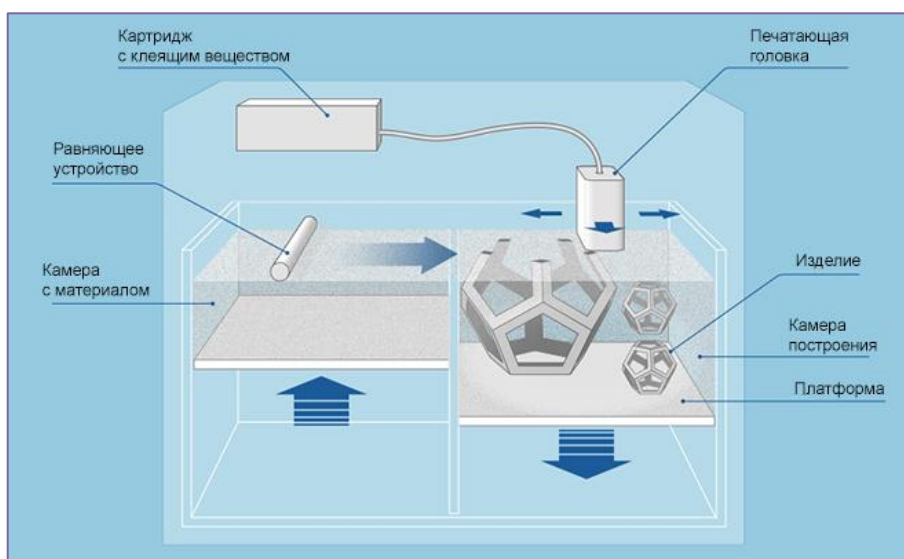


Рис. 8. Принцип работы CJP⁶
Fig. 8. Principle of operation CJP

SLS (Selective Laser Sintering) – технология лазерного запекания, при которой образуются особо прочные изделия различных размеров. Технология, схожая с предыдущей по способу нанесения материала, но затвердевание происходит по-другому: с помощью лазеров высокой мощности происходит спекание материала, разравненного специальным ракелем по рабочей плоскости [10].

⁵ Технология 3D-печати FDM (Fused Deposition Modeling) [Электронный ресурс]. - URL: https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/fdm/ (дата обращения: 05.04.2022)

⁶ Технология 3D-печати CJP (Color Jet Printing) [Электронный ресурс]. - URL: <https://cybercad.ru/info/articles/tekhnologiya-3d-pechati-cjp-color-jet-printing/> (дата обращения: 05.04.2022)

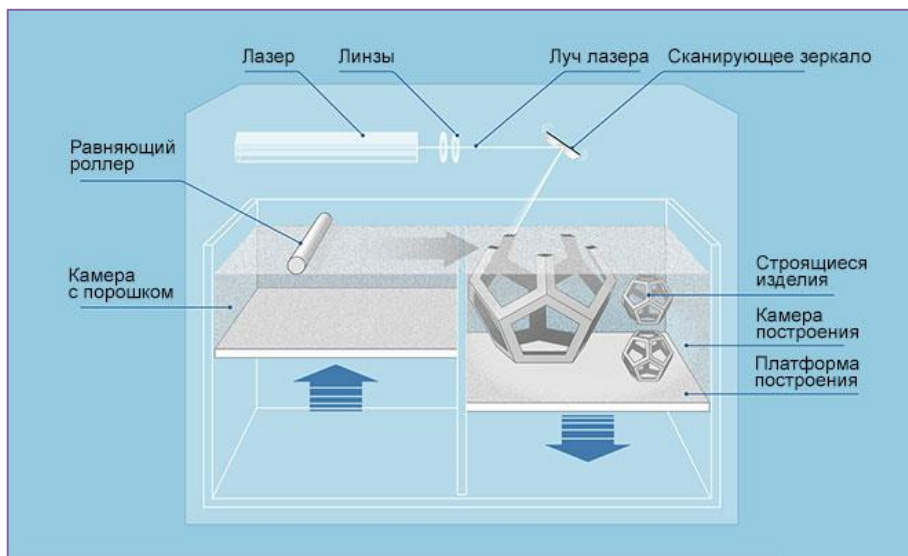


Рис. 9. Принцип работы SLS⁷
Fig. 9. Principle of operation SLS

MJM (MultiJet Modeling) многоструйное 3D-моделирование с использованием фотополимеров и воска. Технология многоструйного моделирования подразумевает использование жидкообразного фотополимера, который наносится на рабочую поверхность печатающей головкой при помощи большого количества форсунок и послойно отверждается ультрафиолетовым проектором [10].

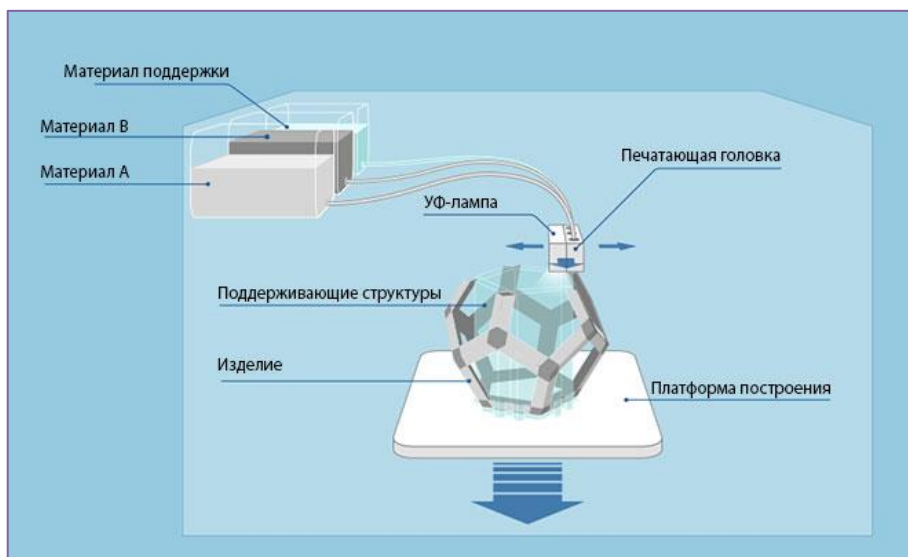


Рис. 10. Принцип работы MJM⁸
Fig. 10. Principle of operation MJM

SLA (Laser Stereolithography) – при помощи лазера происходит послойное отвердевание жидкого полимера. В ванночку наливается фотополимер, застывающий от ультрафиолетового излучения и после туда опускается плоскость, к которой прикрепляется первый слой. На дне ванны располагается дисплей, который засвечивает определенную область [10]. После данных манипуляций слой полимеризуется на вышележащем, а рабочая поверхность поднимается и происходит засвечивание последующего слоя.

⁷ Технология спекания порошков SLS (Selective Laser Sintering) [Электронный ресурс]. - URL: https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/sls-tech/ (дата обращения: 05.04.2022)

⁸ Технология 3D-печати MJM (Multi Jet Modeling) [Электронный ресурс]. - URL: https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/mjm/ (дата обращения: 05.04.2022)

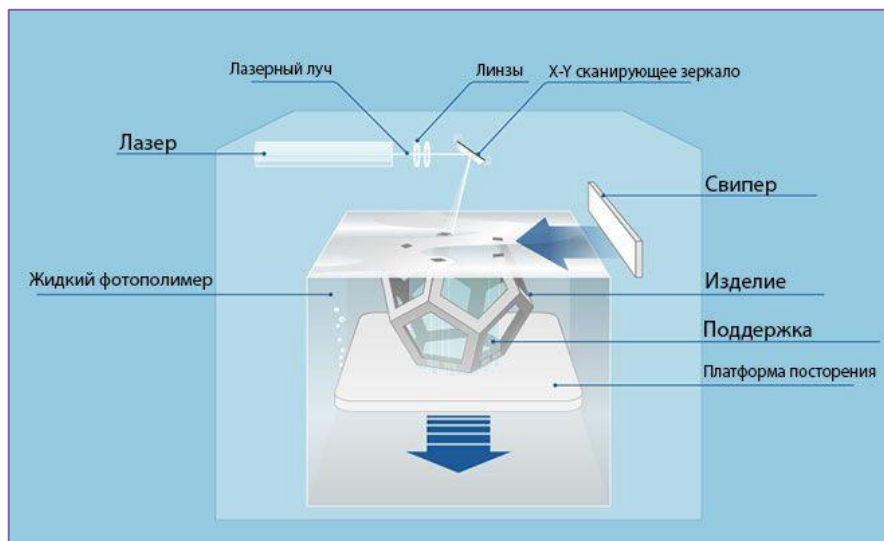


Рис. 11. Принцип работы SLA⁹
Fig. 11. Principle of operation SLA

Впервые о данной технологии в строительстве было упомянуто в работах профессора Бехроха Хошневиса из Южно-Калифорнийского университета в августе 2012 г. Его научная группа выдвинула идею конструкции огромного, собираемого на строительной площадке 3D-принтера по типу мостового крана. Данный метод стал основополагающим для 3D-принтеров китайской компании WinSun, которая первой напечатала несколько настоящих домов в начале 2014 г. [12]. Уникальность сооружения заключается в использовании запатентованного материала, который представляет собой смесь строительного мусора, бетона и добавок. Такие дома относятся к классу недорогого быстровозводимого жилья.



Рис. 12. Пример дома, напечатанный с помощью послойного экструдирования¹⁰
Fig. 12. An example of a house printed using layer-by-layer extrusion

Метод послойного экструдирования является одним из основных способов 3D-печати большинства строительных принтеров. Суть заключается в том, что рабочее сопло, или экструдер, 3D-машины выдавливает быстротвердеющую смесь (состав смеси может быть различным), в которую включены различные добавки, улучшающие характеристики будущей конструкции. Каждый очередной слой выдавливается 3D-принтером поверх предыдущего, благодаря этому формируется определенная конструкция [12].

⁹ SLA 3D-принтер для печати миниатюрных изделий [Электронный ресурс]. - URL: <https://втораяиндустриализация.рф/sla-3d-printer/> (дата обращения: 05.04.2022)

¹⁰ Топ-10 зданий, напечатанных на 3D-принтере [Электронный ресурс]. - URL: https://www.architime.ru/specarch/top_10_3d_print_buildings/3d_print.htm (дата обращения: 11.04.2022)

ПРИМЕРЫ ЗДАНИЙ, ПОСТРОЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Каждый год благодаря постоянному развитию аддитивных технологий появляется всё больше зданий и сооружений, построенных по технологии 3D-печати.

Российский опыт аддитивного строительства начался с октября 2017 года, в Ярославле компания Спецавиа построила первый в СНГ и Европе жилой дом с помощью метода 3D-печати (рис.13).

Развитие аддитивных технологий является критически значимым направлением для Российской Федерации. Основные потребители аддитивных технологий сконцентрированы в стратегически важных для экономики отраслях, таких как авиация и космос (30%), медицина (15%), машиностроение (25%) и центры аддитивного производства (15%), прочие отрасли (15%). Россия к 2030 году намерена стать одним из мировых лидеров в области аддитивных технологий¹¹. Для достижения поставленной цели разработана дорожная карта «Технологии новых материалов и веществ», утверждена Стратегия развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 г., создана Ассоциация развития аддитивных технологий.



Рис. 13. Полностью напечатанный дом [13]
Fig. 13. Fully printed house



Рис. 14. Проект временного жилья для беженцев и лишившихся жилья от природных катаклизмов¹²
Fig. 14. Temporary housing project for refugees and displaced by natural disasters

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СФЕРЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Евдокимов Н.В., Кеутаева А.Н. дают оценку возможности использования древесных отходов в аддитивных технологиях [14]. На основании анализа существующих технологий авторы дают рекомендации по условиям подготовки древесных отходов для их использования в 3D-печати. Авторы анализируют возможность использования древесных отходов, возникающих в целлюлозно-бумажной промышленности, для чего рассматривают одну из распространенных схем древесно-подготовительного цеха ЦБП, которая предполагает образование 2-5% опилок. Приводят описание оборудования, в результате работы которого может образоваться требуемая для 3D-печати фракция древесных отходов [15].

Все больше научных публикаций появляется на тему исследования возможности использования материалов или добавок, характерных для российских регионов. Так, например, в работе [16] Бондарев Б.А., Баязов В.А., Корнеев О.О., Востриков И.А., Мещеряков А.А., Корнеева А.О. приводят результаты экспериментов, позволяющих оптимизировать состав строительных смесей для 3D-печати с помощью использования доменного шлака, который является побочным продуктом ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Результаты подобных исследований представлены в работах [17-19], где Усанова К.Ю., Барабанщиков Ю.Г., Акимов С.В., Беляева С.В., Кротов О.М., Pakrastins L. и другие провели исследования керамзитобетона с добавками молотого гранулированного доменного шлака, микрокремнезема, добавки суперпластификатора и воздухововлекающей добавки для 3D-печати. Исследованы тепловыделение бетона и теплопроводность бетона в зависимости от состава бетона (цемент, водоцементный коэффициент, керамзит), добавок (шлак, микрокремнезем) и примесей (суперпластификатор, воздухововлекающий агент). Также проведены аналогичные исследования бетона с другими добавками. Кириллова Н.К., Алексеева А.Н., Егорова А.Д. [20] привели результаты

¹¹ Россия к 2030 году намерена стать одним из мировых лидеров в области аддитивных технологий [Электронный ресурс]. - URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/13103861> (дата обращения: 13.08.2022)

¹² Есть ли перспективы у 3D-печати домов в России? [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.oknamedia.ru/novosti/est-li-perspektivy-u-3d-pechati-domov-v-rossii-52305> (дата обращения: 11.08.2022)

исследования свойств глинистого сырья Санниковского, Намцырского и Кангаласского месторождений Республики Саха (Якутия). Загороднюк Л.Х., Елистраткин М.Ю., Подгорный Д.С., Ал Мамури С.К.Ш. представили результаты исследований композиционных вяжущих для аддитивных технологий с использованием портландцемента и техногенных отходов - отходов мокрой магнитной сепарации Старооскольского электрометаллургического комбината, модифицированных добавками-ускорителями и пластификаторами. Авторы доказали эффективность использования полученного композиционного вяжущего, применение которого обеспечивает повышение реологических свойств, а также даёт возможность экономить дорогостоящий портландцемент [21].

В последние годы стали появляться научные исследования в сфере создания строительной смеси, которую можно использовать при отрицательных температурах, что позволит использовать технологию 3D-печати зимой, увеличить продолжительность строительного сезона и расширить географию применения аддитивных технологий [22-25]. Беляева С.В., Баранов А.О., Самохвалова К.А., Клещевникова В.И., Рогозинникова Д.В. провели ряд экспериментов, которые показали, что в качестве компонента по замещению цемента хорошо показал себя доменный шлак. Для применения смеси в условиях пониженных температур необходимо использовать специальные добавки: хлористый натрий, формиат натрия, нитрит натрия, поташ, но их применение зависит от остальных составляющих смеси. Количество противоморозной добавки не должно превышать 25% от массы раствора, превышение этого показателя может привести к потере прочности и образованию высолов [23].

Отдельное внимание исследователи уделяют определению прочностных характеристик напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов [26, 27]. В общем случае, исследования предполагают сравнение прочности на сжатие монолитных и напечатанных на строительном 3D-принтере конструктивных элементов. Более детально основные этапы исследования представлены, например, в работе [27]:

1. Разработка модели для печати в программных комплексах AutoCAD, SheetCAM, Mach3;
2. Печать конструктивных элементов на строительном принтере «АМТ» S-6044;
3. Испытание образцов на прессе Гагарина;
4. Сравнение прочности на сжатие монолитных и напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов.

Перспективным направлением исследований является идея объединить две технологии, которые до недавнего времени существовали абсолютно отдельно: 3D-печать и BIM-технологии. Например, архитектор разрабатывает BIM-модель, а инженер с помощью поэтажного плана или даже всей конструкции здания считает толщину и прочность компонентов, время затвердевания бетона и т.д. Затем эта информация передается инженеру, работающему с 3D-принтером, а он уже в соответствии с ней настраивает скорость печати и т.д. Эти данные крайне важны для 3D-печати и должны храниться в BIM-модели, из которой их можно извлечь в любой момент [28, 29].

Кроме перспектив совместного использования BIM-технологий и 3D-печати необходимо учитывать и возможности строительной техники. Сегодня основным видом техники на строительных площадках по-прежнему являются строительные краны. Для постепенного перехода к автоматизированному строительству Салахова А.В., Демидова Ю.А., Кротов О.М. предлагают возможность повышения функционала стандартного башенного крана, используемого на строительной площадке, для проведения работ по аддитивной печати (для автоматизированного безопасного бетонирования), а также определяют целесообразность такого решения [30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современном развивающемся мире механизация и цифровизация окружают нас во всех сферах жизни, включая строительство. Одним из примеров автоматизации являются аддитивные технологии или 3D-печать. Строительство является довольно трудной, дорогостоящей и травмоопасной отраслью. В свою очередь 3D-печать имеет несколько главных преимуществ, способных снизить стоимость строительства, уменьшить время возведения зданий, а также снизить количество несчастных случаев, тем самым повысить уровень безопасности на строительной площадке [31]. Было предпринято много усилий для реализации применения возможностей аддитивных технологий, но все еще остаются некоторые практические вопросы.

Исследованиями и разработками аддитивных технологий в строительстве активно занимаются крупные мировые институты, большие строительные компании, отдельные исследователи, которым интересно применение 3D-печати при возведении зданий и сооружений. Ожидается, что улучшение и

оптимизация строительной отрасли будут происходить одновременно сразу по нескольким основным направлениям. Основными тенденциями отечественных научных исследований в сфере материалов для 3D-печати в последние годы являются: использование древесных отходов, доменного шлака и прочих добавок, характерных для российских регионов, поиск наиболее эффективных при отрицательных температурах составов строительной смеси для аддитивной печати, определение прочностных характеристик напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов, возможность совместной работы 3D-печати и BIM-технологий и др. При этом в технологии 3D-печати все еще остается множество неисследованных проблем, требующих более детального изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панфилова А.Д., Шиняева М.В., Когай В.В., Шаранова А.В. Материалы для аддитивных технологий в строительстве // Дни науки. материалы межвузовской научно-технической конференции студентов и курсантов на базе ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет». 2019. С. 372-375.
2. Shatornaya A.M., Chislova M.M., Drozdetskaya M.A., Ptušina I.S. Efficiency of 3D printing in civil engineering // Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. № 9 (60). С. 22-30.
3. Беляева С.В., Кротов О.М., Гокканен А.И., Обмачкин В.А. Применение 3D-принтера в строительной отрасли // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием, Инженерно-строительный институт: В 3 частях. Ответственные редакторы: Н. Д. Беляев, В. В. Елистратов. 2019. С. 83-85.
4. Сабаева С.В. Применение 3D-печати в строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 5(5). С. 39-44. URL: <http://eng-res.ru/archive/2021/5/39-44.pdf>
5. Демиденко А.К., Кулибаба А.В., Иванов М.Ф. Перспективы применения 3D-печати в строительном комплексе Российской Федерации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 12 (63). С. 71-96. DOI: 10.18720/CUBS.63.4
6. Коротеев Д.Д., Коренева А.И. Применение аддитивных технологий производства в строительстве на примере разработки 3D-модели с последующей печатью // Системные технологии. 2021. № 2 (39). С. 21-30.
7. В Томске разработали первый российский 3D-принтер для работы в космосе [Электронный ресурс]. - URL: <https://ria.ru/20220505/tpu-1786916688.html> (дата обращения: 05.04.2022)
8. Ильина Л.В., Завадская Л.В. Аддитивные технологии в строительстве // В сборнике: Повышение качества и эффективности строительных и специальных материалов. Сборник Национальной научно-технической конференции с международным участием. 2019. С. 200-207.
9. Ильина Л.В., Завадская Л.В. Особенности и задачи строительного материаловедения по освоению 3D-технологий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 10 (718). С. 98-106.
10. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 1 (52). С. 27-46. DOI: 10.18720/CUBS.52.3
11. Алексеева А.Н., Егорова А.Д. Применение аддитивных технологий в строительстве и при изготовлении керамических изделий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 134-141.
12. Славчева Г.С. Строительная 3d-печать сегодня: потенциал, проблемы и перспективы практической реализации // Строительные материалы. 2021. № 5. С. 28-36.
13. Михайлов Н.И. 3D-печать в строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 3 (3). С. 28-35. EDN: OHOVFM
14. Евдокимов Н.В., Кеутаева А.Н. Оценка возможности использования древесных отходов в аддитивных технологиях // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 103-109. DOI: 10.46418/2619-0729_2022_1_16
15. Евдокимов Н.В., Кеутаева А.Н. Характеристика древесных отходов при производстве технологической щепы с оценкой возможности их использования в аддитивных технологиях // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2022. № 2. С. 119-122. DOI: 10.46418/2619-0729_2022_2_21
16. Бондарев Б.А., Баязов В.А., Корнеев О.О., Востриков И.А., Мещеряков А.А., Корнеева А.О. Подбор составов смесей для 3D печати // Вестник евразийской науки. 2021. Т. 13. № 3. DOI: 10.15862/29SAVN321
17. Usanova K., Barabanshchikov Yu.G., Pakrastins L., Akimov S.V., Belyaeva S.V. Heat release and thermal conductivity of expanded-clay concrete for 3D printer // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 2 (102). С. 10210.
18. Usanova K., Barabanshchikov Yu.G., Krasova A.V., Akimov S.V., Belyaeva S.V. Plastic shrinkage of concrete modified by metakaolin // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 3 (103). С. 10314.
19. Шамсутдинова В.Ф., Кротов О.М., Барабанщиков Ю.Г. Расширяющаяся добавка для бетона на основе золы-уноса Назаровской ГРЭС // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. сборник материалов Всероссийской конференции. 2022. С. 351-352.

20. Кириллова Н.К., Алексеева А.Н., Егорова А.Д. Применение аддитивных технологий в строительстве и при изготовлении керамических изделий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 134-141. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-134-141
21. Загороднюк Л.Х., Елистраткин М.Ю., Подгорный Д.С., Ал Мамури С.К.Ш. Композиционные вяжущие для 3D аддитивных технологий // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. № 4 (80). С. 428-439. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-4-428-439
22. Самохвалова К.А., Клещевникова В.И., Беляева С.В. Экспериментальное исследование свойств бетонных смесей для 3D-печати // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 56-58.
23. Самохвалова К.А., Рогозинникова Д.В., Беляева С.В. Смеси для строительной печати в условиях пониженных температур // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 59-61.
24. Kleshchevnikova V., Belyaeva S., Baranov A. Optimization of mix designs and experimental study of the properties of concrete mix for 3D printing // В сборнике: Proceedings of ECECE 2020. Energy, Environmental and Construction Engineering. Cham, 2021. С. 151-160.
25. Беляева С.В., Клещевникова В.И., Баранов А.О. Оптимизация составов и экспериментальное исследование свойств бетонной смеси для 3D печати // В сборнике: Инженерные задачи: проблемы и пути решения. Материалы II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова. 2021. С. 24-27.
26. Кротов О.М., Птухина И.С. Разработка элементов зданий с помощью мобильного строительного принтера // В сборнике: Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2021. Сборник докладов Второй Национальной научной конференции. Москва, 2022. С. 943-948.
27. Школяр Ф.С., Кротов О.М. Определение прочностных характеристик напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 35-38.
28. Эффективное сочетание BIM и 3D-печати бетоном [Электронный ресурс]. - URL: <https://file-system.ru/poleznaya-informatsiya/news/4865/> (дата обращения: 16.04.2022)
29. Krause M., Otto J. 3D-concrete-printing: Digital data flow with BIM // Bauingenieur. 2019. Т.94. Vol.5. Pp. 171-178.
30. Салахова А.В., Демидова Ю.А., Кротов О.М. Автоматизация башенных кранов с целью строительной 3D-печати // В сборнике: BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры. Материалы V Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией А.А. Семенова. Санкт-Петербург, 2022. С. 246-251.
31. Горелова А.А., Вавилова А.М. Разработка алгоритма действий по предотвращению несчастных случаев на производстве // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2020. С. 104-106.

ОБ АВТОРАХ

Герман Андреевич Титов – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: german.titov.03@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

German A. Titov – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: german.titov.03@mail.ru