

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 69.04

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ
СТЕРЖНЕВОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА
С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛАА.А. Мельников¹, Т.Р. Баркая¹, А.В. Каляскин²¹Тверской государственный технический университет (г. Тверь)²ООО «ПКБ ОСТОВ» (г. Тверь)

© Мельников А.А., Баркая Т.Р., Каляскин А.В., 2025

Аннотация. В статье рассмотрена методика расчета железобетонного стержневого элемента с учетом физической нелинейности материала в условиях огневого воздействия, а также приведено сравнение пределов огнестойкости при вычислении с учетом нелинейной работы материалов и без нее.

Ключевые слова: огнестойкость, нелинейность, предел огнестойкости, бетон, арматура, железобетон.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-5-12

В существующей методике расчета предела огнестойкости стержневого элемента, рассмотренной в источнике [1], не принимаются во внимание изменения физических свойств материала, но предлагается определять редуцированное сечение и оценивать предел несущей способности по формуле

$$N = \varphi(R_{bn} \cdot A_{red} + R_{sct} \cdot A_{s,tot}), \quad (1)$$

где A_{red} – приведенная площадь сечения; $A_{s,tot}$ – площадь всей продольной арматуры в сечении.

A_{red} находят по формуле

$$A_{red} = 0.9 \cdot (b - 2a_t) \cdot (h - 2a_t), \quad (2)$$

где a_t – уровень критической температуры по высоте сечения.

Возьмем за основу железобетонный пилон размерами 1000×200 мм с армированием 10 стержнями 18-го диаметра арматуры класса А500С. Считаем пилон отдельно стоящим, поэтому огневое воздействие будем рассматривать с четырех сторон. Поперечное сечение пилона показано на рис. 1.

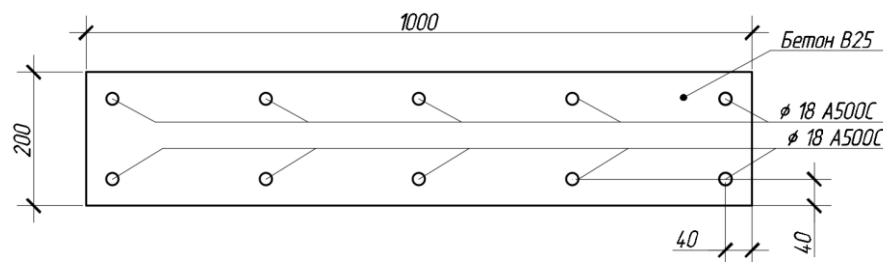


Рис. 1. Поперечное сечение элемента

По результатам статического расчета приняты усилия в пилоне (табл. 1).

Таблица 1

Усилия в пилоне

Усилие	N , т	M_k , т·м	M_y , т·м	Q_z , т	M_z , т·м	Q_y , т
Значение	-206,605	0,05	-1,759	0,87	0,517	0,548

Требуемый предел огнестойкости для несущих конструкций назначим R90. Определим несущую способность пилона по методике, описанной в источнике [1].

Коэффициент φ для дальнейших расчетов принимаем 0,85. При 90-минутном огневом воздействии назначаем:

$$a_t = 37 \text{ мм};$$

$$A_{s,tot} = 25,45 \text{ см}^2;$$

$$A_{red} = 0,9 \cdot (100 - 3,7 \cdot 2) \cdot (20 - 3,7 \cdot 2) = 1\,050 \text{ см}^2.$$

В результате расчета получаем

$$N = \frac{0,85}{1\,000} \cdot (188 \cdot 1\,050 + 4\,350 \cdot 0,85 \cdot 25,45) = 247,77 \text{ т} > 206,605 \text{ т}.$$

Следовательно, несущая способность сечения обеспечена.

Далее для корректного расчета необходимо назначить характеристики материалов, которые изменяются в зависимости от распределения температуры внутри сечения, поэтому сначала требуется определить значение температуры бетона и арматуры в характерных точках сечения. При этом температура меняется в зависимости от длительности действия стандартного пожара.

Выбираем шаг, с которым будем определять значение температуры внутри сечения. Он составит 20 мм, так как существующие графики распределения тепловых полей имеют аналогичный шаг.

По приложению А из источника [1] устанавливаем температуру в бетонном сечении в соответствии с рис. 2.

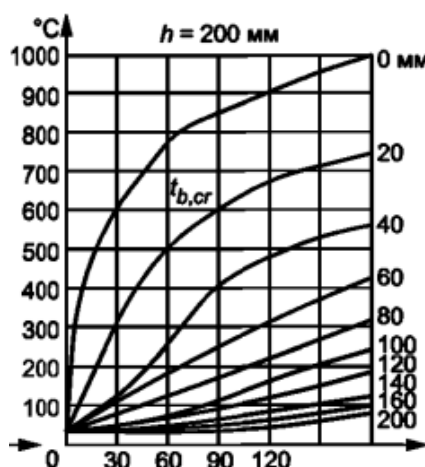


Рис. 2. Температуры прогрева тяжелого бетона в плитах и стенах высотой сечения 200 мм при одностороннем воздействии пожара [1]

Таким образом, используя рис. 1, определяем температуру внутри бетонного сечения размерами $1\,000 \times 200$ мм с шагом 20 мм при продолжительности стандартного огневого воздействия 90 мин.

По полученным значениям температуры внутри сечения можно установить, какая температура действует на высоте рабочей продольной арматуры, и назначить понижающие коэффициенты условий работы, а для бетонного сечения следует назначить ряд коэффициентов, которые бы показывали с шагом 20 мм, какое значение расчетного сопротивления бетона сжатию необходимо задавать участку бетонного сечения, чтобы смоделировать изменение физических свойств материала при огневом воздействии.

Для определения коэффициентов условий работы используем данные источника [1]. Интерполяцией устанавливаем указанные коэффициенты и сводим их в табл. 2.

Таблица 2

Определение температуры внутри бетонного сечения

Глубина прогрева	Температура на глубине сечения при толщине 200 мм	Коэффициенты условий работы γ_{bt}
0	850	0,1
20	600	0,1
40	400	0,65
60	250	0,9
80	180	0,975
100	–	1
Время воздействия стандартного пожара	90 мин	90 мин

В соответствии с полученными коэффициентами можно найти значения сопротивления бетона сжатию при огневом воздействии. Результаты сводим в табл. 3.

Таблица 3

Назначенные классы бетона по толщине сечения
(исходный бетон В25, $R_{bn} = 18,5$ МПа)

Глубина прогрева	R_{bnt}	В
0	1,85	–
20	12,025	15
40	16,65	20
60	18,037 5	20
80	18,5	25
100	18,5	25

Для полученных классов бетона строим трехлинейные диаграммы напряженного состояния бетона при продолжительном действии нагрузки. На рис. 3 показаны диаграммы деформирования для бетонов разных классов.

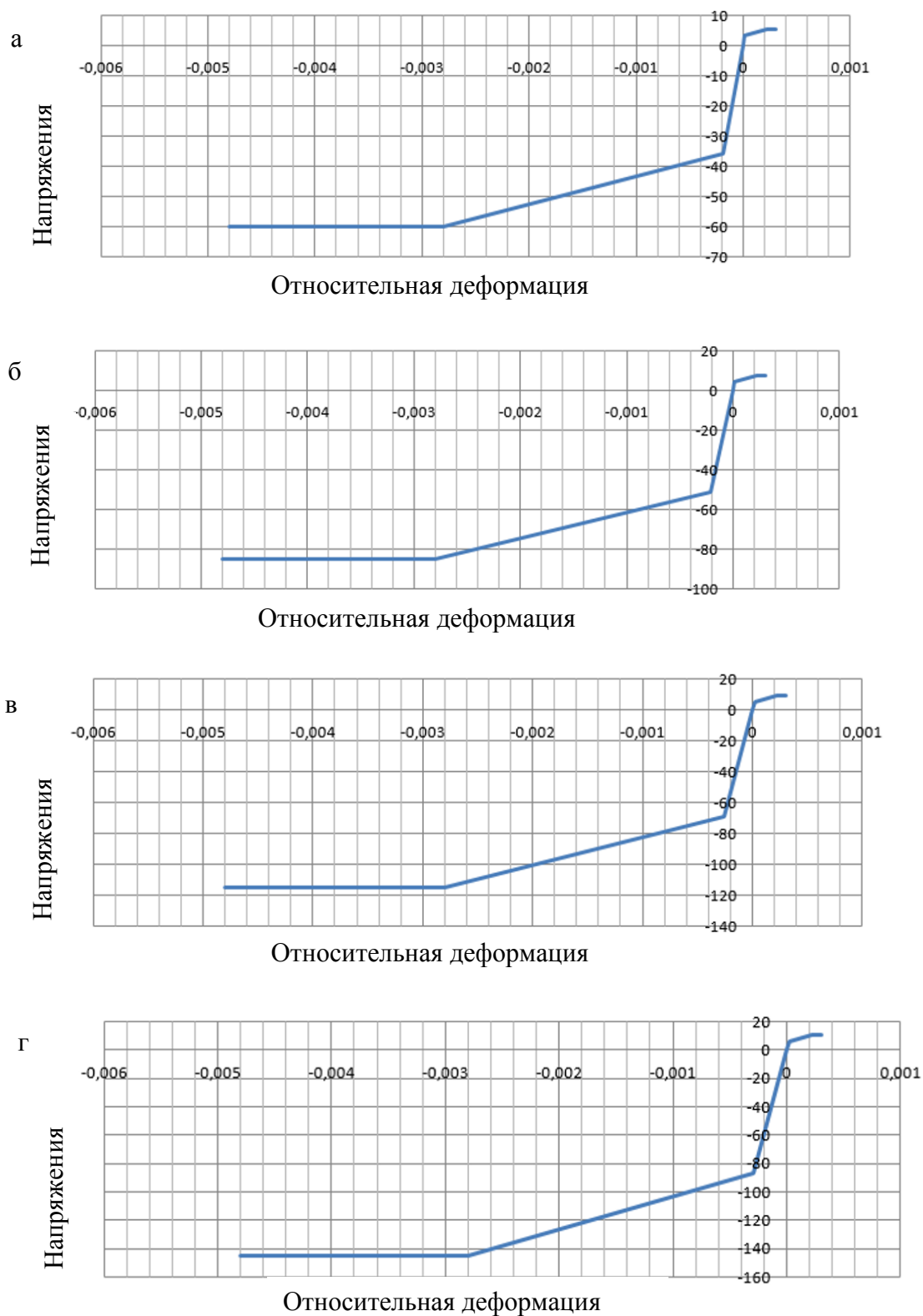


Рис. 3. Диаграммы деформирования для бетонов:
а – B10; б – B15; в – B20; г – B25

Выполняем аналогичные действия для арматуры, вычисляем температуры, действующие на глубине расположения арматуры, и получаем коэффициенты условий работы арматуры (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты γ_{st} и β_s при защитном слое 40 мм

t, мин	γ_{st}	E_s , МПа	β_s	E_{st} , МПа
90 мин	0,85	200 000	0,85	170 000

После применения коэффициентов строим диаграмму напряженного состояния арматуры А500 (рис. 4).

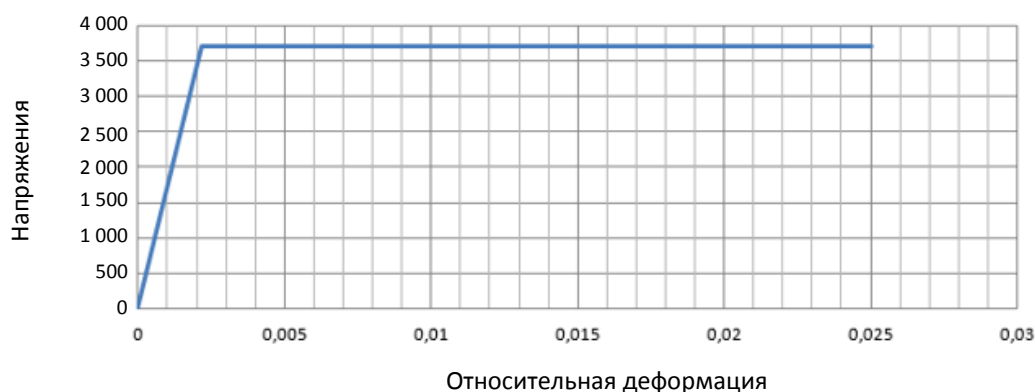


Рис. 4. Диаграмма напряженного состояния арматуры при 90-минутном действии стандартного пожара

Для наглядности нанесем слои, соответствующие прочности полученных классов бетона, на поперечное сечение (рис. 5).

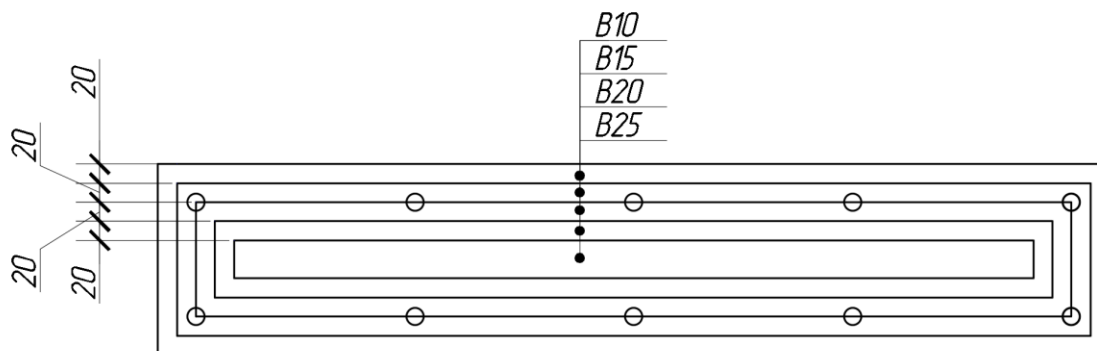


Рис. 5. Назначенные классы бетона по толщине сечения

Таким образом, получаем поперечное сечение пилон с разными классами бетона (расчетными сопротивлениями бетона осевому сжатию) по мере их нагрева.

При выполнении расчета считаем, что плоское поперечное сечение при получении деформаций остается плоским в соответствии с гипотезой Бернулли. Соответственно, распределение относительных деформаций по высоте сечения элемента принимаем по линейному закону. Существующие программные комплексы не позволяют создать такое сечение, поэтому была написана программа на базе Visual Basic 6.0. В данной программе необходимо выстраивать поперечное сечение с триангуляционной сеткой 20×20 мм, задавая послойно соответствующие классы бетона по рис. 3. Программа позволяет для каждого назначенного класса бетона подгрузить собственную диаграмму деформирования. Далее, задавая перемещения и углы поворотов плоского сечения, мы получаем относительные деформации каждой точки триангуляционной плоскости. Данные относительные деформации накладываются на ранее загруженные диаграммы напряженно-деформированного состояния бетона и арматуры, показывая возникающие напряжения в каждой ячейке размером 20×20 мм до наступления предельных напряжений в сжатом бетоне или сжатой арматуре.

Установив напряжения в каждой точке заданной сетки и составив уравнения равновесия, мы можем получить усилия в рассматриваемом элементе:

$$N = \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj}; \quad (3)$$

$$M_x = \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{bxi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{sxj}; \quad (4)$$

$$M_y = \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{byi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{syj}. \quad (5)$$

Усилия, получившиеся в результате расчета поперечного сечения, перед сравнением с действующими усилиями снижаем на коэффициент продольного изгиба, учитывающий снижение несущей способности.

Результаты расчета приводим в виде изополей напряжений в поперечном сечении (рис. 6–8).

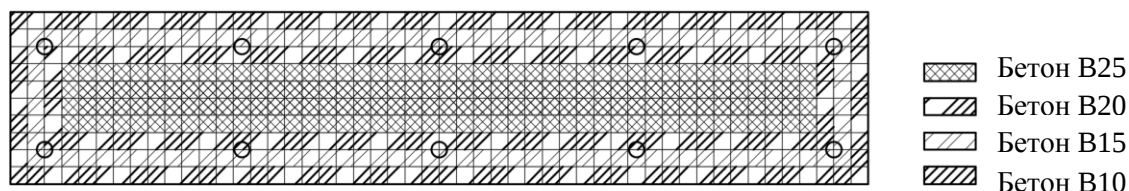


Рис. 6. Расчетная схема сечения

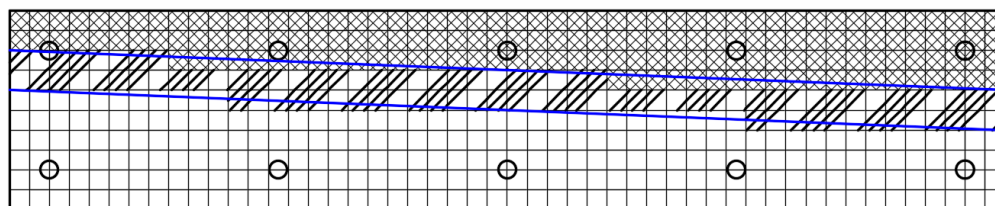


Рис. 7. Поля напряжений при предельных действующих усилиях:

$$M_x = 2,01 / M_y = 0,82$$

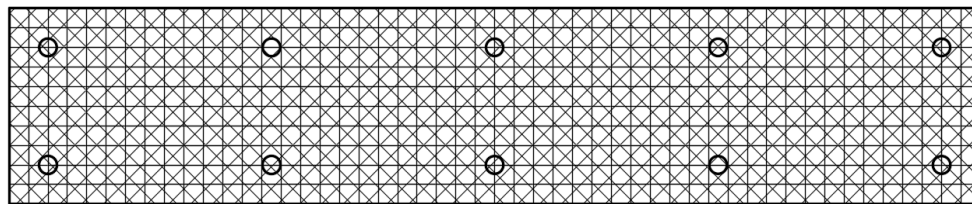


Рис. 8. Поля напряжений при предельных действующих усилиях:

$$M_x = 2,01 / M_y = 0,82 / N = 305,41$$

Итак, при времени воздействия 90 мин несущая способность сечения составит 305 т.

В рассматриваемом случае при 90-минутном воздействии пожара несущая способность сечения с учетом физической нелинейности составила 259,25 т, а без нее – 247,77 т. Эти значения достаточно схожи, но данное исследование необходимо проводить в динамике, чтобы понять, как будет изменяться несущая способность с увеличением времени действия пожара. Полученные по приведенной методике результаты показывают резерв по несущей способности около 25 %. При расчете по методике [1] увеличение времени действия пожара приводит к росту α_t , что предполагает исключение из работы всей арматуры, в то время как при применении нелинейного расчета появляется возможность расчета с послойным снижением прочности (класса) бетона поперечного сечения. Однако для подтверждения достоверности полученных результатов необходимо проведение натурных испытаний контрольных образцов [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564542941> (дата обращения: 23.02.2025).
2. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения: 23.02.2025).
3. Полевода И.И., Жамойдик С.М., Нехань Д.С. Модельные огневые испытания железобетонных центрифугированных колонн с конструктивной огнезащитой // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2021. Т. 5. № 3. С. 289–299.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МЕЛЬНИКОВ Артем Александрович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: Neryose@yandex.ru

БАРКАЯ Темур Рауфович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

КАЛЯСКИН Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, директор ООО «ПКБ ОСТОВ», 170043, Россия, г. Тверь, ул. Псковская, д. 12, корп. 3. E-mail: ostov_tver@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Мельников А.А., Баркая Т.Р., Каляскин А.В. Определение предела огнестойкости стержневого железобетонного элемента с учетом нелинейных свойств материала // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 5–12.

**DETERMINATION OF THE FIRE RESISTANCE LIMIT
OF A REINFORCED CONCTETE BAR ELEMENT
TAKING INTO ACCOUNT MATERIAL NONLINEAR PROPERTIES**

A.A. Melnikov¹, T.R. Barkaya¹, A.V. Kalyaskin²

¹*Tver State Technical University (Tver)*

²*LLC «PKB OSTOV» (Tver)*

Abstract. This article develops a method for calculating a reinforced concrete core element taking into account the physical nonlinearity of the material, and also compares the fire resistance limit when calculating taking into account the nonlinear operation of materials and without it.

Keywords: fire resistance, nonlinearity, fire resistance rating, concrete, reinforced, reinforced concrete.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MELNIKOV Artem Alexandrovich – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Neryose@yandex.ru

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

KALYASKIN Alexander Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of LLC «PKB OSTOV», 12, Pskovskaya street, Tver, 170043, Russia. E-mail: ostov_tver@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Melnikov A.A., Barkaya T.R., Kalyaskin A.V. Determination of the fire resistance limit of a reinforced conctete bar element taking into account material nonlinear properties // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 5–12.