
**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ/CONSTRUCTION STRUCTURES,
BUILDINGS AND STRUCTURES**

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.62.4>
**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРИМЕРЕ
СТАЛЬНОЙ ФЕРМЫ**

Научная статья

Кувшинов Д.А.¹, Гаврилов Т.А.^{2*}, Колесников Г.Н.³¹ ORCID : 0000-0001-6292-0935;² ORCID : 0000-0003-3671-0971;³ ORCID : 0000-0001-9694-0264;^{1,2,3} Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (gtimmo[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассмотрена разработка и обобщен опыт применения комплекса для дистанционного мониторинга напряженно-деформированного состояния строительных конструкций на примере стальной фермы. Необходимость разработки комплекса вызвана отсутствием экономичных технических решений для дистанционного мониторинга напряженно-деформированного состояния строительных конструкций в рамках учебного процесса при изучении раздела «Фермы» курса «Металлические конструкции» по направлению подготовки «Строительство». Актуальность темы данной работы обусловлена возросшим в период Covid-19 спросом на дистанционные технологии проведения лабораторных работ в рамках учебного процесса по направлению подготовки «Строительство». После указанного периода актуальность развития технологий дистанционного мониторинга напряженно-деформированного состояния строительных конструкций сохранилась, т.к. позволила автоматизировать процессы как управления нагрузкой на узлы фермы, так и все стадии мониторинга. Рассмотренный комплекс разработан с использованием методов физико-технического анализа состояния систем и их управлением, а также способов сбора и анализа измерений продольных деформаций стержней фермы и перемещений ее узлов. Комплекс предназначен для использования в учебном процессе, однако апробированные методологические и технические решения могут быть адаптированы к мониторингу таких несущих строительных конструкций, как балки и деревянные фермы. Новизна и технический эффект от использования разработанного первого варианта комплекса подтверждены патентом RU 2806841.

Ключевые слова: испытания ферм, измерение усилий в стержнях, измерение перемещений узлов, дистанционное управление, строительные конструкции.

**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A COMPLEX FOR REMOTE MONITORING OF STRESS-STRAIN
STATE OF BUILDING STRUCTURES ON THE EXAMPLE OF A STEEL TRUSS**

Research article

Kuvshinov D.A.¹, Gavrilov T.A.^{2*}, Kolesnikov G.³¹ ORCID : 0000-0001-6292-0935;² ORCID : 0000-0003-3671-0971;³ ORCID : 0000-0001-9694-0264;^{1,2,3} Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation

* Corresponding author (gtimmo[at]mail.ru)

Abstract

The article examines the development and summarises the experience of using the complex for remote monitoring of stress-strain state of building structures on the example of a steel truss. The necessity of the complex design is caused by the lack of cost-effective technical solutions for remote monitoring of the stress-strain state of building structures in the educational process during the study of the section "Trusses" of the course "Metal Structures" in the training field "Construction". The relevance of the topic of this work is conditioned by the increased demand for remote technologies of laboratory works within the educational process in the direction of training "Construction" during the period of Covid-19. After the mentioned period, the relevance of the development of technologies for remote monitoring of the stress-strain state of building structures remained, because it allowed to automate the processes of both load control on the truss nodes and all stages of monitoring. The reviewed complex is developed using methods of physical and technical analysis of the state of systems and their control, as well as methods of collecting and analysing measurements of longitudinal deformations of truss rods and displacements of its nodes. The complex is intended for use in the educational process, but the tested methodological and technical solutions can be adapted to the monitoring of such load-bearing building structures as beams and wooden trusses. The novelty and technical effect from the use of the developed first version of the complex are certified by the patent RU 2806841.

Keywords: truss testing, bar force measurement, node displacement measurement, remote control, building structures.

Введение

Быстрое развитие компьютерных технологий создает новые возможности для совершенствования технических средств обучения, в том числе в области подготовки специалистов по направлению «Строительство» [1]. В данной статье рассматривается реализация одной из таких возможностей, которая была реализована в связи с необходимостью использования дистанционной формы обучения в период пандемии Covid-19 [2]. В этот период, в целях обеспечения непрерывности учебного процесса, в ПетрГУ был разработан и изготовлен учебно-лабораторный комплекс с дистанционным управлением и мониторингом процесса испытаний для изучения напряженно-деформированного состояния ферм [3]. Накопленный к настоящему времени опыт показал, что использование комплекса целесообразно при подготовке специалистов по направлению «Строительство» в рамках заочной формы обучения, т.к. в дистанционном режиме позволяет полностью автоматизировать процесс загрузки узлов фермы внешними силами, снятия отсчетов вертикальных перемещений узлов и внутренних сил в стержнях, фотофиксацию конструкции до и после испытаний (для подтверждения малости деформаций конструкции).

На момент создания данного комплекса были известны способ и устройства для дистанционного обучения [4], [5], [6]. Однако известные способы и устройства для их реализации базировались на виртуальных испытаниях, не обеспечивали автоматизацию проведения эксперимента с использованием физических аналогов реальных конструкций в дистанционном режиме и, как следствие, не формировали навыки дистанционного управления и дистанционной калибровки и обработки результатов измерений в процессе обучения, что необходимо при мониторинге состояния конструкций, функционирующих в зонах, опасных для здоровья людей, в том числе в период ограничений по медицинским показаниям, связанным с пандемией. Кроме того, формирование навыков анализа состояния конструкций необходимо для мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений в период их реконструкции в соответствии с ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния». Анализ литературы [7], [8], [9], [10] показал, что проблема создания учебно-лабораторного комплекса с дистанционным управлением для изучения напряженно-деформированного состояния металлических ферм является актуальной.

Новизна технических решений компонентов и комплекса в целом подтверждена патентом [3]. Принимая во внимание, что эти технические решения, после их доработки и адаптации могут быть использованы для мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций ферм без непосредственного участия персонала, как в учебном процессе, так и в существующих сооружениях, можно сделать вывод о целесообразности более детального рассмотрения устройства и функционирования данного комплекса. Таким образом, цель работы заключается в обобщении опыта дистанционного управления при подготовке специалистов по направлению «Строительство» на примере изучения напряженно-деформированного состояния ферм.

Методы, принципы и результаты исследования

Стальная ферма пролетом 3.2 м и высотой 0.4 м, входящая в состав комплекса как объект испытаний, изготовлена в соответствии с требованиями ГОСТ 23118-2019 «Конструкции стальные строительные». Комплекс содержит две идентичные фермы, что обеспечивает стабильность положения объекта испытаний, по аналогии с реальными конструкциями покрытий промышленных зданий. Стержни фермы выполнены из профиля замкнутого поперечного сечения в форме квадрата со стороной 40 мм, толщина стенки профиля 2 мм. Стержни соединены в узлах посредством электродуговой сварки. На стадии расчета и сравнения экспериментальных и расчетных значений усилий в стержнях и перемещений узлов ферма рассматривается как статически определимая шарнирно-стержневая конструкция, одна из опор которой является шарнирно-неподвижной, а вторая — шарнирно-подвижной. Заметим, что в модифицированной конструкции комплекса предусмотрена возможность исследования как статически определимых, так и статически неопределимых стальных и деревянных ферм и балок после несложной адаптации первоначально разработанного варианта (Рисунок 1).



Рисунок 1 - Общий вид комплекса:

1 – исследуемая конструкция в виде стальной фермы; 2 – основание; 3 – электромеханические домкраты; 4 – электронные динамометры; 5 – блоки управления нагрузкой; 6 – цифровые прогибомеры; 7 – тензодатчики для измерения осевой деформации стержней; 8 – блоки измерения деформаций; 9 – центральный блок коммутации
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.62.4.1>

Учебно-лабораторный комплекс состоит из следующих элементов (Рисунок 1):
Структурно-логическая схема комплекса представлена на Рисунке 2.

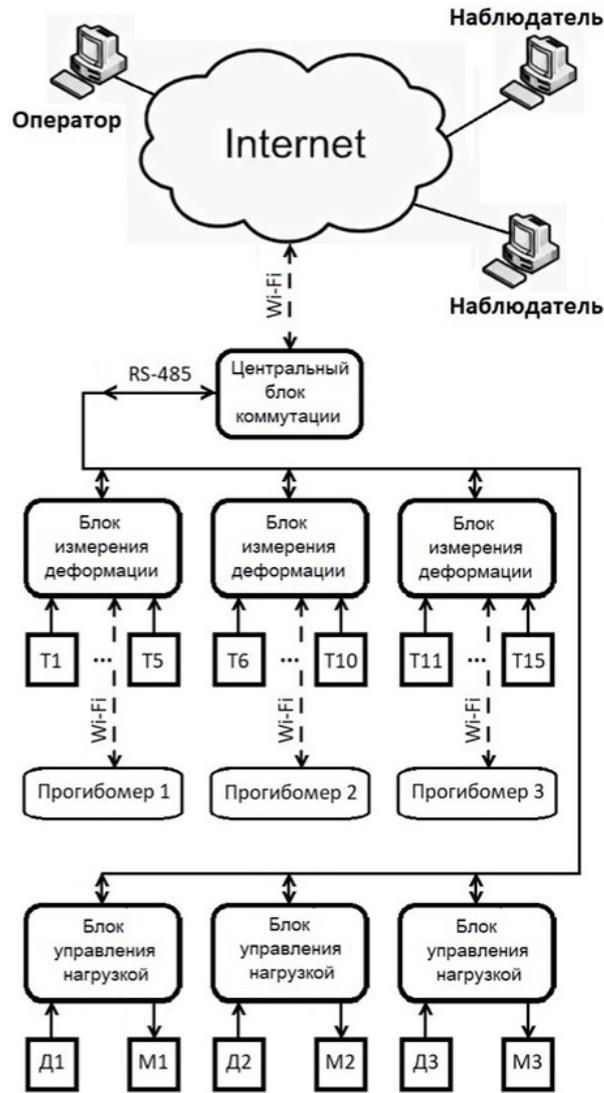


Рисунок 2 - Структурно-логическая схема комплекса:

T1-T15 – тензодатчики; *Д1-Д3* – электронные динамометры; *М1-М3* – электромеханические домкраты

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.62.4.2>

Центральный блок коммутации 9 (Рисунок 3) выполнен с возможностью подключения к учебно-лабораторному комплексу удаленных пользователей по беспроводной технологии связи Wi-Fi. При этом в качестве оператора установки может быть подключен только один пользователь, число одновременно подключенных клиентов в качестве наблюдателей ограничивается только пропускной способностью сети.

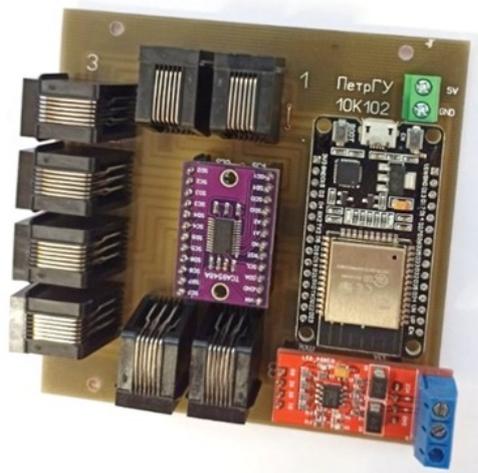


Рисунок 3 - Центральный блок коммутации
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.62.4.3>

Блоки управления нагрузкой 5 (Рисунок 4) и блоки измерения деформаций 8 (Рисунок 5) подключены к центральному блоку коммутации 9 по проводному интерфейсу RS-485.



Рисунок 4 - Блок управления нагрузкой на узлы
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.62.4.4>



Рисунок 5 - Блок измерения продольных деформаций стержней
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.62.4.5>

Центральный блок коммутации 9 работает на основе программы [11], которая осуществляет обмен данными с блоками управления нагрузкой 5 и блоками измерения деформации 8, а также с компьютерами подключенных пользователей.

Оператор отправляет команды управления учебно-лабораторным комплексом, которые получает центральный блок коммутации 9 и переадресует их блокам управления нагрузкой 5. Нагружение исследуемой конструкции 1, установленной на основание 2, осуществляется при помощи электромеханических домкратов 3 (Рисунок 6), электропитанием которых управляют блоки 5 в зависимости от полученных команд оператора. Одновременно с этим блоки управления нагрузкой 5 производят измерение прикладываемой узловой нагрузки посредством электронных динамометров 4 (Рисунок 7) и передают измеренные значения центральному блоку коммутации 9 с последующей их отправкой на компьютеры пользователей, подключенных как в качестве оператора, так и наблюдателей.



Рисунок 6 - Электромеханический домкрат
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.62.4.6>



Рисунок 7 - Динамометр с электронным датчиком
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.62.4.7>

Измерение прогибов и осевой деформации стержней исследуемой конструкции 1 осуществляется при помощи блоков измерения деформаций 5 при помощи цифровых прогибомеров 6 (Рисунок 8) и тензодатчиков 7 (Рисунок 9). Измеренные значения передаются центральному блоку коммутации с последующей их отправкой на компьютеры всех подключенных пользователей.



Рисунок 8 - Цифровой прогибомер
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.62.4.8>

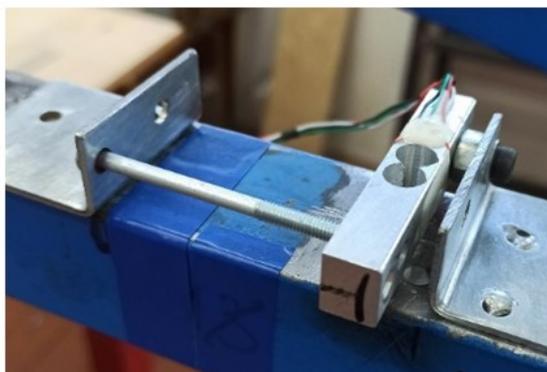


Рисунок 9 - Механическая часть тензомера
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.62.4.9>

Технический результат от использования предлагаемого учебно-лабораторного комплекса заключается в том, что данный комплекс обеспечивает:

- 1) повышение точности измерений нагрузки, прикладываемой к узлам исследуемой конструкции, линейных перемещений узлов конструкции и продольных деформаций стержней конструкции;
- 2) автоматизацию процесса нагружения и мониторинга напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции (измерения линейных перемещений узлов конструкции и продольных деформаций ее элементов);
- 3) дистанционное проведение испытаний в режиме реального времени;
- 4) снижение трудоемкости проведения испытаний.

Тем самым создаются новые технические возможности для формирования у обучающихся компетенций, достаточных для работы с реальными конструкциями и устройствами, а также формирования навыков мониторинга и дистанционного управления техническим состоянием конструкций и устройств, функционирующих без прямого участия обучающихся и обучающихся лиц, в том числе в зонах, опасных для здоровья людей.

Накопленный опыт использования представленного стенда (Рисунки 1–9) показал, что при необходимости результаты исследования могут быть использованы для мониторинга реальных строительных конструкций после модификации с учётом конкретных условий.

Заключение

Научной новизной данной работы является предлагаемый способ дистанционного проведения учебных занятий при изучении напряженно-деформированного состояния металлических ферм и его реализация посредством специально разработанного комплекса [3], который первоначально предназначался для использования в период пандемии [2], но оказавшийся эффективным в обычных условиях при проведении занятий как в традиционной, так и дистанционной форме. Результаты исследования могут быть адаптированы в рамках учебного процесса по направлению «Строительство» к испытаниям деревянных ферм с соединениями стержней посредством металлических зубчатых пластин, а также таких несущих строительных конструкций, как рассмотренные в [12] составные балки двутаврового сечения с полками из досок и стенкой из ориентированной стружечной плиты. В этой связи важно отметить, что применение древесины, как возобновляемого ресурса соответствует современным экологическим требованиям.

Эффект от использования разработанного комплекса, как показала практика его использования, выражается в повышении методологического уровня проведения соответствующих учебных занятий за счет уменьшения рутинных

операций, а также в уменьшении потребности во вспомогательном персонале за счет автоматизированного управления нагрузкой, проведения испытаний фермы и электронной фиксации результатов для дальнейшего анализа.

Блочная структура комплекса (Рисунки 1 и 2) обеспечивает его универсальность, благодаря чему подобные комплексы могут быть использованы для мониторинга напряженно-деформированного состояния значительно более широкого круга строительных конструкций.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Вильданов И.Э. Проблемы и пути цифровизации высшего строительного образования. / И.Э. Вильданов, Р.С. Сафин, Р.Н. Абитов и др. // Казанский педагогический журнал. — 2022. — № 2 (151). — С. 69–75.
2. Bloom N. The impact of COVID-19 on productivity. / N. Bloom, P. Bunn, P. Mizen et al. // Review of Economics and Statistics. — 2025. — № 107 (1). — P. 28–41.
3. Пат. 2806841 Russian Federation, МПК G01N 3/02. Учебно-лабораторный комплекс с дистанционным управлением для изучения напряженно-деформированного состояния металлических ферм / Костюкевич В.М., Кувшинов Д.А., Колесников Г.Н. и др.; заявитель и патентообладатель Петрозаводский государственный университет. — № 2023109216; заявл. 2023-04-11; — 15 с.
4. Пат. 92223 Russian Federation, МПК G09B 7/02. Учебный измерительный комплекс / Дёмин С.Б., Ермолаев Н.А., Шадрин М.П.; заявитель и патентообладатель Дёмин Станислав Борисович, Ермолаев Николай Александрович, Шадрин Михаил Павлович. — № 2009142525; заявл. 2009-11-17; — 8 с.
5. Пат. 69664 Russian Federation, МПК G09B 25/04. Имитационная модель профессионального обучения / Давыдов В.А.; заявитель и патентообладатель Давыдов Виктор Алексеевич. — № 2007116843; заявл. 2007-05-03; — 5 с.
6. Пат. 119111 Russian Federation, МПК G01N 3/00. Стенд для экспериментальных исследований составных конструкций / Маркин Ю.С., Маркин О.Ю., Маркин К.О.; заявитель и патентообладатель Казанский государственный энергетический университет. — № 2012110705; заявл. 2012-03-20; — 7 с.
7. Kyvelou P. Testing and analysis of optimized wire arc additively manufactured steel trusses. / P. Kyvelou, A. Spinasa, L. Gardner // Journal of Structural Engineering. — 2024. — № 150 (3). — P. 04024008.
8. Barros B. Design and testing of a decision tree algorithm for early failure detection in steel truss bridges. / B. Barros, V. Conde, M. Cabaleiro et al. // Engineering Structures. — 2023. — № 289. — P. 116243.
9. Almasabha G. Simple truss model to estimate the shear strength of short links in the eccentrically braced frame (EBF) steel system. / G. Almasabha, R. Al-Mazaidh // Thin-Walled Structures. — 2023. — № 188. — P. 110811.
10. Caredda G. Analysing local failure scenarios to assess the robustness of steel truss-type bridges. / G. Caredda, M.C. Porcu, M. Buitrago et al. // Engineering Structures. — 2022. — № 262. — P. 114341.
11. Пат. 2024663327 Russian Federation, МПК 0. Программа для дистанционного управления учебно-лабораторным комплексом для изучения напряженно-деформированного состояния металлических ферм / Кувшинов Д.А., Гаврилов Т.А.; заявитель и патентообладатель Петрозаводский государственный университет. — № 2024661238; заявл. 2024-05-20; — 1 с.
12. Томченко М.Ю. Экспериментальное исследование составных балок двутаврового сечения из древесины с ОСП-стенкой на изгиб. / М.Ю. Томченко, А.Н. Торопцева, Д.В. Нижегородцев // Инновации и инвестиции. — 2023. — № 3. — С. 366–369.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Vil'danov I.E'. Problemy' i puti cifrovizacii vy'sshego stroitel'nogo obrazovaniya [Problems and ways of digitalization of higher construction education]. / I.E'. Vil'danov, R.S. Safin, R.N. Abitov et al. // Kazan Pedagogical Journal. — 2022. — № 2 (151). — P. 69–75. [in Russian]
2. Bloom N. The impact of COVID-19 on productivity. / N. Bloom, P. Bunn, P. Mizen et al. // Review of Economics and Statistics. — 2025. — № 107 (1). — P. 28–41.
3. Pat. 2806841 Russian Federation, IPC G01N 3/02. Uchebno-laboratoryj kompleks s distancionny'm upravleniem dlya izucheniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallicheskih ferm [Training and laboratory complex with remote control for studying stress strain state of metal framework] / Kostyukevich V.M., Kuvshinov D.A., Kolesnikov G.N. et al.; the applicant and the patentee Petrozavodsk State University. — № 2023109216; appl. 2023-04-11; — 15 p. [in Russian]
4. Pat. 92223 Russian Federation, IPC G09B 7/02. Uchebnyj izmeritel'nyj kompleks [Educational measuring complex] / Dyomin S.B., Ermolaev N.A., Shadrin M.P.; the applicant and the patentee Demin Stanislav Borisovich, Ermolaev Nikolay Alexandrovich, Shadrin Mikhail Pavlovich. — № 2009142525; appl. 2009-11-17; — 8 p. [in Russian]
5. Pat. 69664 Russian Federation, IPC G09B 25/04. Imitacionnaya model' professional'nogo obucheniya [Simulation model of vocational training] / Davy'dov V.A.; the applicant and the patentee Davydov Viktor Alekseevich. — № 2007116843; appl. 2007-05-03; — 5 p. [in Russian]

6. Pat. 119111 Russian Federation, IPC G01N 3/00. Stend dlya e'ksperimental'ny'x issledovanij sostavny'x konstrukcij [A stand for experimental research of composite structures] / Markin Yu.S., Markin O.Yu., Markin K.O.; the applicant and the patentee Kazan State Power Engineering University. — № 2012110705; appl. 2012-03-20; — 7 p. [in Russian]
7. Kyvelou P. Testing and analysis of optimized wire arc additively manufactured steel trusses. / P. Kyvelou, A. Spinasa, L. Gardner // *Journal of Structural Engineering*. — 2024. — № 150 (3). — P. 04024008.
8. Barros B. Design and testing of a decision tree algorithm for early failure detection in steel truss bridges. / B. Barros, B. Conde, M. Cabaleiro et al. // *Engineering Structures*. — 2023. — № 289. — P. 116243.
9. Almasabha G. Simple truss model to estimate the shear strength of short links in the eccentrically braced frame (EBF) steel system. / G. Almasabha, R. Al-Mazaidh // *Thin-Walled Structures*. — 2023. — № 188. — P. 110811.
10. Caredda G. Analysing local failure scenarios to assess the robustness of steel truss-type bridges. / G. Caredda, M.C. Porcu, M. Buitrago et al. // *Engineering Structures*. — 2022. — № 262. — P. 114341.
11. Pat. 2024663327 Russian Federation, IPC 0. Programma dlya distancionnogo upravleniya uchebno-laboratorny'm kompleksom dlya izucheniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallicheskih ferm [Program for remote control of the educational laboratory complex for studying the stress-strain state of metal trusses] / Kuvshinov D.A., Gavrilov T.A.; the applicant and the patentee Petrozavodsk State University. — № 2024661238; appl. 2024-05-20; — 1 p. [in Russian]
12. Tomchenko M.Yu. E'ksperimental'noe issledovanie sostavny'x balok dvutavrovogo secheniya iz drevesiny' s OSP-stenokoj na izgib [Experimental study of composite I-beams made of wood with OSB web on bending]. / M.Yu. Tomchenko, A.N. Toropceva, D.V. Nizhegorodcev // *Innovation and investment*. — 2023. — № 3. — P. 366–369. [in Russian]