

УДК 624.011

Кузнецов Иван Леонидович

доктор технических наук, профессор

E-mail: kuz377@mail.ru

Арипов Далер Насимович

аспирант

E-mail: architector-1992@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Фахрутдинов Адель Эдуардович

главный инженер, кандидат технических наук

E-mail: faxrutdinoff@yandex.ru

АО «ОЭЗ Иннополис»

Адрес организации: 420500, Россия, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 7

Болтовое соединение в стержневых конструкциях из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП)

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – определить фактическую прочность пултрузионного стеклопластика при различных углах пултрузии к направлению усилий.

Поставлена задача – на основе полученных фактических значений прочности реализовать болтовое соединение в стержневых конструкциях, где усилия передаются под различными углами к направлению пултрузии.

Результаты. Основные результаты исследований состоят в выявлении запаса прочности пултрузионного стеклопластика при различных углах к направлению усилия. Фактический запас прочности позволяет реализовать узловые соединения в решетчатых конструкциях с наименьшими затратами материала.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в расширении области применения пултрузионных стеклопластиковых профилей при строительстве легких зданий.

Ключевые слова: поперечная рама, болтовое соединение, стеклопластик, пултрузия, смятие.

Введение

В настоящее время весьма актуальным является применение пултрузионных стеклопластиковых изделий в авиации, железнодорожном транспорте, строительстве и других областях техники [1]. Уникальные свойства пултрузионных профилей дают возможность применять их во многих отраслях строительства, сельского хозяйства и других сферах деятельности. Вместе с тем, применение данных профилей в несущих конструкциях сдерживается. Значительное влияние на это оказывает состояние нормативной базы и отсутствие опыта возведения конструкций из ПСП. Существующие нормативные документы являются рекомендациями отдельных производств или стандартами различных ассоциаций.

Фермы и рамные конструкции из ПСП проектируются и конструируются более 30 лет [2]. Анализ существующих рекомендаций показывает, что одной из проблем при разработке стержневых конструкций из ПСП является обеспечение требуемой прочности и деформативности соединений элементов. Узловые соединения в стержневых конструкциях из ПСП выполняются преимущественно болтовыми [3], где усилия передаются под различными углами к направлению пултрузии [4]. В работах [5-6] приведены примеры разработок и конструирование стержневых конструкций из ПСП. В исследованиях ученые рассмотрели влияние направления пултрузии к усилию, размеров крепежных элементов, минимальных расстояний между болтами на несущую способность соединения.

Разработка и исследование поперечной рамы из ПСП

В рамках настоящей статьи для исследования болтовых соединений элементов из ПСП, работающих на сдвиг предложена поперечная рама здания, с габаритами и параметрами, приведенными на рис. 1.

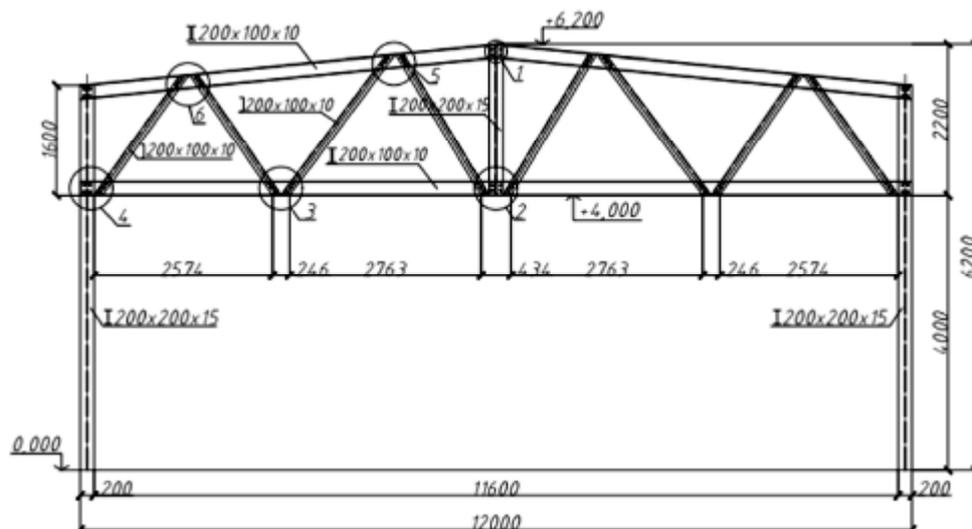


Рис. 1. Поперечная рама здания из ПСП пролетом 12 м, высотой до низа ферм 4 м, установленная с шагом 4 м (иллюстрация авторов)

В ходе исследования рамы здания были выполнены компьютерное моделирование, расчеты и конструирование несущих элементов с учетом реальных физико-механических характеристик композитного материала. Статистический расчет каркаса здания из ПСП производился с учетом нагрузок от собственного веса, снеговых (для IV района) и ветровых (для II района) нагрузок согласно СП 20.13330.2016. Статистический расчет был выполнен в программном комплексе «ЛИРА-САПР», реализующем метод конечных элементов.

При конструировании поперечной рамы был использован швеллер 200×100×10 мм и двутавр 200×200×15 мм производства ООО «Татнефть-Пресскомпозит» (г. Елабуга) [7-8]. Элементы решетки поперечной рамы (рис. 2) работают в оптимальных условиях, так как направление пултрузии совпадает с направлением действия усилия [8]. Узлы соединения запроектированы с применением стальных болтов класса 5.6 диаметром 18 мм, отверстия под болты приняты диаметром 19 мм, диаметр шайб – 36 мм согласно «Руководство по проектированию и расчету строительных конструкций из пултрузионных стеклопластиковых профилей производства ООО «Татнефть-Пресскомпозит».

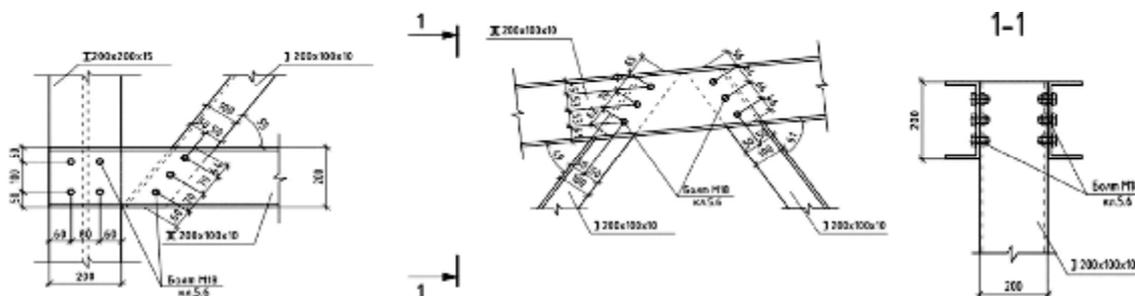


Рис. 2. Узлы соединения элементов рамы здания из ПСП (иллюстрация авторов)

Исследование несущей способности узловых соединений

Несущая способность соединения должна превышать усилие, действующее в узле:

$$S \leq S_{нес.}$$

где S – усилие, действующее в узле,

$S_{нес}$ – несущая способность соединения.

$$S_{нес} = \min\{nS_{bp}; S_{nt}; S_{LT}; S_{cl}\},$$

где S_{bp} – несущая способность материала профилей на смятие,

S_{nt} – несущая способность материала профилей на растяжение,

S_{LT} – несущая способность материала профилей на срез,

S_{cl} – несущая способность материала профилей на скалывание.

При конструировании болтовых соединений смятие является единственным вариантом отказа, не приводящим к хрупкому разрушению. В табл. приведены результаты расчетов несущей способности болтовых соединений поперечной рамы.

Таблица

Несущая способность болтовых соединений рамы здания

№ узлов	S_{bp} , кН	S_{nt} , кН	S_{LT} , кН	S_{cl} , кН	S_{min} , кН
1	25,2	208,89	252	113,19	25,2
2	20,16	48,13	144	67,39	20,16
3	20,16	48,13	144	67,39	20,16
4	20,16	48,13	144	67,39	20,16
5	20,16	57,41	139,2	67,15	20,16
6	20,16	58,12	163,2	82,03	20,16

Из табл. видно, что при конструировании данных болтовых соединений, определяющим фактором является несущая способность материала профилей на смятие. Все узлы, кроме опорного (узел № 4) и сопряжения раскосов с верхним поясом (узел № 6), проходят требуемые проверки, и законструированы с некоторым запасом прочности. При этом расчетное сопротивление на смятие согласно рекомендациям принимается в зависимости от θ (угол между направлением усилия в соединении и направлением пултрузии) равным $R_{bp, L}^p$ при $0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$ или $R_{bp, T}^p$ при $5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$.

Авторами статьи было предположено, что расчетное сопротивление под различными углами фактически выше, нежели это указано в рекомендациях, и запас прочности позволит реализовать конструктивные решения узлов (4-6).

Композитные материалы рассматривают как материал, создаваемый совместно с конструкцией, а информацию о его свойствах получают на основе результатов испытаний таких «характерных» образцов, которые адекватно отражали бы специфику работы КМ в составе реальной конструкции [9]. Для подтверждения фактических значений прочности материала при различных углах были проведены экспериментальные исследования (рис. 3) с использованием универсальной разрывной машины марки ИР 5082-200. Для определения и оценки деформаций соединений был использован навесной экстензометр с базой 50 мм. После испытания образцов были получены графики зависимости деформаций в соединении от прикладываемого усилия.

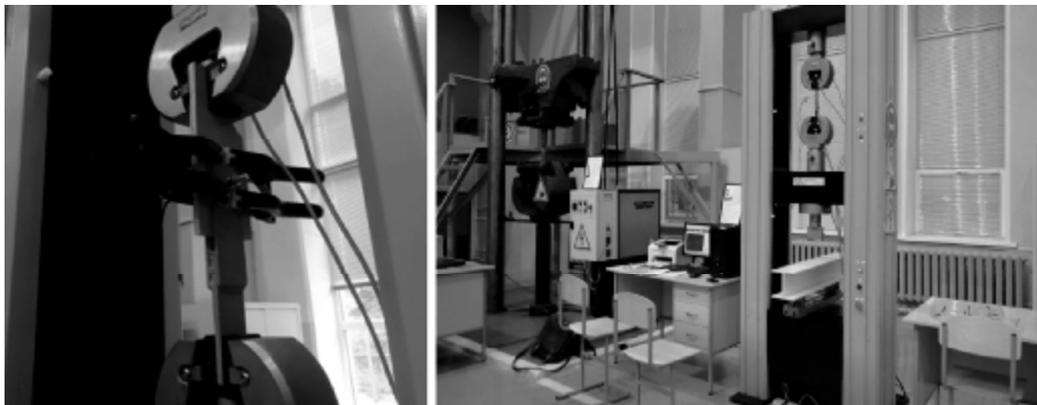


Рис. 3. Общий вид испытательного стенда на базе универсальной испытательной машины марки ИР 5082-200 (иллюстрация авторов)

На первом этапе был предложен узел соединения, состоящий из металлического захвата и листа пултрузии, который имитирует работу одноболтового соединения. Минимальные размеры были приняты на основе п. 11.1.1 Руководства по проектированию и расчету строительных конструкций из пултрузионных стеклопластиковых профилей производства ООО «Татнефть-Пресскомпозит». После проведения испытаний образцов с направлением волокон 0° и 90° было выявлено, что данные образцы не подходят для правильной оценки работы узла. Экспериментально установлено, что при направлении волокон 0° узел теряет несущую способность из условия среза (рис. 4а), при 90° теряет несущую способность из условия скалывания (рис. 4б). Экспериментальные исследования показали, что, при рекомендованных расстояниях, согласно руководству, происходит хрупкое разрушение.

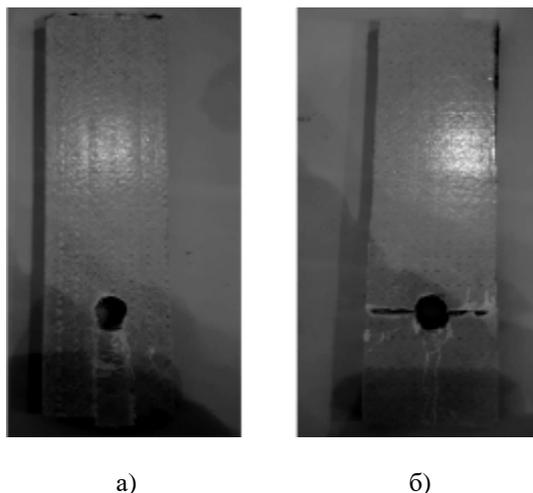


Рис. 4. Разрушение образцов из ПСП: а – при направлении волокон – 0° ; б – при направлении волокон – 90° (иллюстрация авторов)

Для исключения нежелательных вариантов отказа были уточнены геометрические характеристики экспериментального образца узлового соединения (рис. 5).

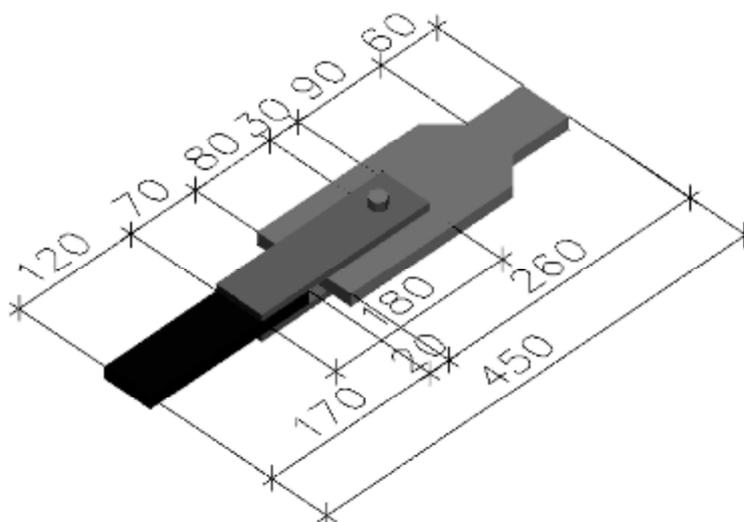
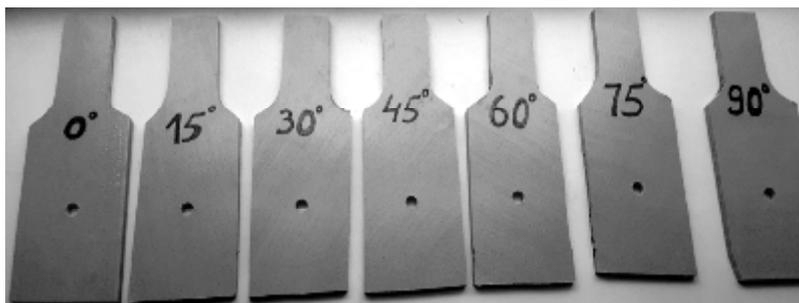
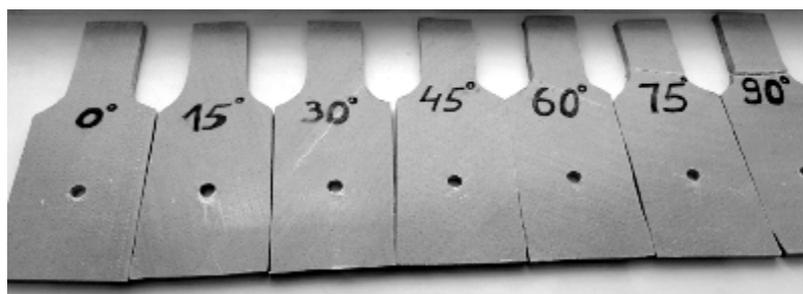


Рис. 5. Образец для испытаний (иллюстрация авторов)

На втором этапе авторами статьи были разработаны и испытаны семь образцов с одинаковой геометрией, при этом направление пултрузии в образцах менялось от 0° до 90° с шагом 15° [10] (рис. 6).



а)



б)

Рис. 6. Образцы для проведения испытаний:

а – до проведения испытаний; б – после проведения испытаний (иллюстрация авторов)

По результатам испытаний составлен график зависимости предельно допустимой нагрузки при смятии пултрузионного листа, перемещений от угла направления пултрузии (рис. 7-8). Теоретические значения несущей способности на смятие, при расчете согласно руководству, занижены, что приводит к перерасходу материала конструкции и экономической нецелесообразности.



Рис. 7. График зависимости несущей способности при смятии от угла направления пултрузии (иллюстрация авторов)



Рис. 8. График зависимости перемещений от угла направления пултрузии (иллюстрация авторов)

В законструированном каркасе (рис. 1) все раскосы расположены под углом близким к 45° . На третьем этапе авторами статьи были разработаны и испытаны 5 образцов с направлением волокон пултрузии под углом 45° для определения среднего расчетного сопротивления. После экспериментальных исследований 5-ти образцов были получены следующие значения:

- 1) 1320 кгс (образец деформируется на 0,9 мм);
- 2) 1280 кгс (образец деформируется на 1,0 мм);
- 3) 1200 кгс (образец деформируется на 0,7 мм);
- 4) 1180 кгс (образец деформируется на 1,2 мм);
- 5) 1090 кгс (образец деформируется на 1,3 мм).

Минимальный вероятностный предел прочности определяется при статической обработке результатов испытаний стандартных образцов на кратковременную нагрузку. Несущую способность определяем по формуле:

$$S_{bp} = S_{bp,cp} \times (1 - 2,25 \times c_v),$$

где $S_{bp,cp}$ – среднее арифметическое значение предела прочности, определяемое по формуле:

$$S_{bp,cp} = \frac{\sum S_{bp}}{n},$$

c_v – коэффициент изменчивости, определяемый по формуле:

$$c_v = \frac{S_{bp,кв}}{S_{bp,cp}},$$

$1 - 2,25 \times c_v$ – величина, на которую следует уменьшить среднее арифметическое значение пределов прочности для получения несущей способности с вероятностью значения исследуемой характеристики (0,99), достаточной для безопасной эксплуатации конструкции.

$$S_{bp,кв} = \sqrt{\frac{\sum (S_{bp} - S_{bp,cp})^2}{n-1}} = 89,89 \text{ кгс.}$$

Тогда:

$$c_v = \frac{89,89}{1214} = 0,0741.$$

$$S_{bp} = 1214 \times (1 - 2,25 \times 0,0741) = 1011,596 \text{ кгс.}$$

Расчетное сопротивление на смятие определяется по формуле:

$$S_{bp} = dtR_{bp,\sigma^p}. \quad (1)$$

Из формулы (1) выражаем расчетное сопротивление на смятие и получаем:

$$R_{bp,\sigma^p} = 99,204 \text{ МПа.}$$

Перерасчет узлов (4-6) с учетом полученных экспериментальных данных показали, что узлы проходят проверку на прочность.

Заключение

1. Результаты экспериментальных исследований показали, что несущая способность, при изменении угла направления усилия к направлению волокон пултрузии от 0° до 90°, имеет промежуточное значение, отличное от существующих рекомендаций. Испытания показали, что для угла 0° фактическая нагрузка превышает минимальную расчетную нагрузку на 37 %.

2. Экспериментальные исследования узлов с направлением пултрузии в 45° показали, что минимальное расчетное сопротивление с обеспеченностью 95 % для рассмотренной серии образцов составило 99,2 МПа, что выше расчетного сопротивления, приведенного в Руководстве по проектированию и расчету строительных конструкций из пултрузионных стеклопластиковых профилей производства ООО «Татнефть-Пресскомпозит» на 48 %.

3. Учет фактической несущей способности узловых соединений под различными углами позволяет реализовать несущие конструкции с меньшими затратами.

Список библиографических ссылок

1. Ушаков А. Е., Кленин Ю. Г., Сорина Т. Г., Хайретдинов А. Х., Сафонов А. А. Мостовые конструкции из композитов // Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 25–37.
2. Lawrence C. Bank. Composites for construction: Structural Design with FRP Materials. New Jersey, 2006. 567 p.
3. Тиньков Д. В., Сафонов А. А. Оптимальное проектирование композитных ферменных мостовых конструкций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 1. С. 55–62.
4. Фахрутдинов А. Э., Арипов Д. Н. Несущие конструкции сооружений из пултрузионных стеклопластиковых профилей : сб. ст. II Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения» / ВИАМ. Москва, 2017. С. 281–294.
5. Mottram J. T., Zafari B. Pin-bearing strengths for design of bolted connections in pultruded structures // Structures and buildings. 2011. P. 291–305.
6. Oppe M. W., Knippers J. Application of bolted connections in fibre-reinforced polymers. Structures and buildings. 2011. P. 322–332.
7. Продукция // FIBERPULL.RU : Сайты организаций Группы «Татнефть». URL: <http://fiberpull.ru/products/stekloplastikovye-profilii> (дата обращения: 10.06.2018).
8. Тезисы докладов : сб. научных трудов 69-й Всероссийской научной конференции, Казань, 2017. 393 с.
9. Каюмов Р. А., Луканкин С. А., Паймушин В. Н., Холмогоров С. А. Идентификация механических характеристик армированных волокнами композитов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. Науки. 2015. Т. 157. Кн. 4. С. 112–132.
10. Кузнецов И. Л., Фахрутдинов А. Э., Арипов Д. Н. Исследование болтовых соединений элементов из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) : сб. ст. Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы нового поколения. Трансфер инноваций из авиации в приоритетные сектора экономики России» / ВИАМ. Ульяновск, 2018. С. 6–15.

Kuznetsov Ivan Leonidovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: kuz377@mail.ru

Aripov Daler Nasimovich

post-graduate student

E-mail: architector-1992@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Fakhrutdinov Adel Eduardovich

chief engineer, candidate of technical science

E-mail: fakhrutdinoff@yandex.ru**JSC «SEZ»Innopolis»**

The organization address: 420500, Russia, Innopolis, Universitetskaya st.,7

Bolted joint in pultruded glass-reinforced plastic (GRP) profile framings**Abstract**

Problem statement. The main purpose of the research is to determine the actual strength of pultrusion fiberglass at different angles of pultrusion to the direction of force. The task is set – to realize on the basis of the obtained actual strength values the bolted joint in the framing where the forces are transmitted at different angles to the direction of pultrusion.

Results. The main results of the research are to identify the safety factor of pultrusion fiberglass at different angles to the direction of force. The actual strength allows the implementation of nodal joints in framings with the lowest material costs.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry is to expand the scope of pultrusion fiberglass profiles in the construction of light buildings.

Keywords: bent, bolted joint, glass-reinforced plastic, pultrusion, bearing.

References

1. Ushakov A. E., Klenin Y. G., Sorina T. G., Khayretdinov A. H., Safonov A. A. Composites for bridge structures // Composites and nanostructures. 2009. № 3. P. 25–37.
2. Lawrence C. Bank. Composites for construction: Structural Design with FRP Materials. New Jersey, 2006. 567 p.
3. Tinkov D. V., Safonov A. A. Optimal design of composite truss bridge structures // Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 2017. № 1. P. 55–62.
4. Fakhrutdinov A. E., Aripov D. N. Framing structures from pultruded GRP profiles : dig. of art. II all Russian scientific and technical conference «Polymer composite materials and new generation production technologies» / VIAM. Moscow, 2017. P. 281–294.
5. Mottram J. T., Zafari B. Pin-bearing strengths for design of bolted connections in pultruded structures // Structures and buildings. 2011. P. 291–305.
6. Oppe M. W., Knippers J. Application of bolted connections in fibre-reinforced polymers. Structures and buildings. 2011. P. 322–332.
7. Production // FIBERPULL.RU : Websites of the group «Tatneft». URL: <http://fiberpull.ru/products/stekloplastikovyie-profili> (reference date: 10.06.2018).
8. Theses of reports : proceedings of the 69th All-Russian scientific conference, Kazan, 2017. 393 p.
9. Kayumov R. A., Lukankin V. N., Paimushin S. A., Kholmogorov S. A. Identification of Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Composites // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki. 2015. Vol. 157. № 1. P. 112–132.
10. Kuznetsov I. L., Fakhrutdinov A. E., Aripov D. N. A study of bolted joints pultruded GRP profiles elements : dig. of art. All-Russian scientific and technical conference «Polymer composite materials of new generation. Transfer of innovations from aviation to priority sectors of the Russian economy» / VIAM. Ulyanovsk, 2018. P. 6–15.