

УДК: 624.012
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.4
EDN: FYODOA



Адгезивы для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 2: Регулирование прогнозирование модуля упругости

А. Р. Шакиров¹, А. М. Сулейманов¹², И. А. Старовойтова³

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

²Академия наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

³ООО «НПФ «РЕКОН», г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Как показывают исследования в области систем внешнего армирования изменение модуля упругости адгезивов, применяемых при усилении, имеет влияние на напряженно-деформированное состояние усиленных конструкций. Целью работы является регулирование и прогнозирование изменения модуля упругости эпоксидных адгезивов. Задачами исследования являются: разработка дисперсно-наполненных эпоксидных составов с различными модулями упругости, проведение испытаний на прочность и ползучесть и изучение прогностических моделей для прогнозирования модуля упругости дисперсно-наполненных эпоксидных полимеров.

Результаты. Были разработаны эпоксидные составы с различными модулями упругости и определены их физико-механические характеристики. Проведен анализ моделей для прогнозирования модуля упругости эпоксидных полимеров, выявлена хорошая сходимость аналитических моделей с экспериментальными данными.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в выявлении рабочего диапазона для прогностических моделей в зависимости от содержания дисперсного наполнителя. Это позволит предварительно смоделировать физико-механические свойства адгезивов при разработке их с предварительно заданными характеристиками.

Ключевые слова: внешнее армирование, долговечность, усиление, углепластик, эпоксидный адгезив, модуль упругости

Для цитирования: Шакиров А.Р., Сулейманов А.М., Старовойтова И.А. Адгезивы для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 2: Регулирование прогнозирование модуля упругости // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с.32-40, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.4, EDN: FYODOA

The modulus of elasticity of epoxy adhesives used to strengthen reinforced concrete structures with external reinforcement systems. Part 2: Regulation and prediction of changes in the elastic modulus of epoxy adhesives depending on the filler content

A. R. Shakirov¹, A.M. Sulejmanov¹², I. A. Starovoitova³

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

²Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

³SPC RECON LLC, Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* As studies in the field of external reinforcement systems show, a change in the elastic modulus of adhesives used in reinforcement has an effect on the stressed-

strained state of reinforced structures. The purpose of this work is to regulate and predict changes in the elastic modulus of epoxy adhesives. The objectives of the research are: the development of dispersed-filled epoxy compounds with various elasticity modules, conducting strength and creep tests and studying predictive models for predicting the modulus of elasticity of dispersed-filled epoxy polymers.

Results. Epoxy compounds with different elastic modules have been developed and their physical and mechanical characteristics have been determined. The analysis of models for predicting the elastic modulus of epoxy polymers has been carried out, and good convergence of analytical models with experimental data has been revealed.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry consists in identifying the operating range for predictive models depending on the content of the dispersed filler. This will allow you to pre-simulate the physical and mechanical properties of adhesives when developing them with predefined characteristics.

Keywords: external reinforcement, durability, reinforcement, carbon fiber, epoxy adhesive, modulus of elasticity

For citation: Shakirov A. R., Sulejmanov A.M., Starovoitova I. A. The modulus of elasticity of epoxy adhesives used to strengthen reinforced concrete structures with external reinforcement systems. Part 2: Regulation and prediction of changes in the elastic modulus of epoxy adhesives depending on the filler content // News KSUAE, 2024, № 1(67), p.32-40, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.4, EDN: FYODOA

1. Введение

На сегодняшний день усиление строительных конструкций системами внешнего армирования (СВА) углеродными композиционными материалами [1-3] является наиболее эффективным способом повышения их несущей способности. СВА активно применяются как в зарубежной строительной практике [4-6], так и в нашей стране [7].

Как показали результаты первой части исследований, изложенных в предыдущей статье, изменение значения модуля упругости эпоксидных адгезивов оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных системой внешнего армирования. Кроме того, методом ступенчатых изотерм удалось выявить и влияние на долговечность усиленных конструкций.

С учетом вышесказанного, при разработке адгезивов для применения в СВА имеет смысл регулирования их модуля упругости с целью повышения их долговечности. Для оптимизации процесса регулирования модуля упругости полимерных композитов удобно применение аналитических моделей [8, 9], позволяющих прогнозировать данный параметр. В научной литературе известны работы, где рассмотрены методы прогнозирования модуля упругости полимерных композитов [10-12]. Так, например, в работах [13-15] приведены исследования по прогнозированию и регулированию модуля упругости полимерных композитов высокомодульными дисперсными наполнителями.

Целью работы является регулирование и прогнозирование изменения модуля упругости эпоксидных адгезивов в зависимости от содержания наполнителя, выявление сходимости аналитических моделей с экспериментальными данными.

Для достижения поставленной задачи решались следующие задачи:

1. Разработка составов эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости.
2. Определение физико-механических характеристик разработанных составов.
3. Построение моделей для прогноза модулей упругости эпоксидных адгезивов.
4. Сравнение результатов аналитических исследований с экспериментальными данными.

2. Материалы и методы

Приготовление составов эпоксидных адгезивов

В исследованиях были использованы двухкомпонентные клеевые связующие на основе эпоксидных смол РекАРМ-Б [16-18] на эпоксидной основе и смесевом отвердителе из алифатических и ароматических аминов.

Характеристики основы адгезива (компонент А) и отвердителя (компонент Б) описаны в первой части нашей работы.

Для варьирования упруго-прочностных характеристик клеевого связующего было исследовано введение тонкодисперсных наполнителей – кварцевой муки, аэросила и цемента.

В таблице 1 представлены данные по степени наполнения клеевого связующего: в случае введения кварцевой муки и цемента содержание наполнителей изменялось от 25 до 150 масс. ч. на 100 масс. ч. смолы, в случае аэросила – от 1 до 7,5 масс. ч. на 100 масс. ч. смолы. Разница в степени наполнения клеевого связующего обусловлена дисперсностью наполнителей – так, в случае портландцемента и кварцевой муки средний размер частиц составляет от 15-20 до 40-50 мкм, в случае аэросила А300 средний размер первичных частиц составляет всего 7 нм.

Таблица 1

Содержание наполнителей

№ п/п	Состав	v	№ п/п	Состав	v	№ п/п	Состав	v
Кварцевая мука			Аэросил			Цемент		
1	M25	0,18	1	A1	0,01	1	Ц25	0,18
2	M50	0,31	2	A2,5	0,02	2	Ц50	0,31
3	M75	0,4	3	A5	0,04	3	Ц75	0,4
4	M100	0,47	4	A7,5	0,06	4	Ц100	0,47
5	M150	0,57				5	Ц150	0,57

Приготовление образцов и проведение испытаний

Подготовка клеевых связующих для проведения испытаний, размеры образцов и режимы отверждения описаны в первой части статьи.

Испытания проводились на растяжение на универсальной испытательной машине ИР 5082 со скоростью 1 мм/мин. Деформации снимались с помощью экстензометра ИДН 10/25 (Рис. 1). Определение прочности на растяжение, модуля упругости проводилось автоматически.



Рис. 1. Проведение испытаний (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Testing (illustration by the authors)

Построение прогностических моделей и обработка результатов испытаний

Для прогнозирования модуля упругости эпоксидных адгезивов в зависимости от объемного содержания наполнителя использовались известные прогностические зависимости. По умолчанию принята формула Эйнштейна [4]:

$$\frac{E_c}{E_m} = 1 + \left(\frac{5}{2}\right) \vartheta, \quad (1)$$

где E_c - модуль упругости композита, МПа;

E_m - модуль упругости матрицы, МПа;

ϑ - объёмное содержание наполнителя;

Также рассмотрены типичные уравнения для расчета модулей упругости полимерных композитов с наполнителями [5]:

- уравнение Кернера:

$$E_c = E_m \frac{E_f A_k + B_k}{E_m A_k + B_k}, \quad (2)$$

$$\text{где } A_k = \frac{\vartheta}{[(7-5\mu)E_m + (8-10\mu_m)E_f]}; B_k = \frac{(1-\vartheta)}{[15(1-\mu_m)]}; \mu_m \approx 0,5$$

E_f - модуль упругости дисперсного наполнителя, принятый для кварцевой муки и аэросила $E_f^{M,A} = 80000$ МПа, для цемента $E_f^{\text{II}} = 18000$ МПа.

- уравнение Гута и Смолвуда:

$$E_c = E_m (1 + 2,5\vartheta + 14,1\vartheta^2), \quad (3)$$

- уравнение Эйлера – Ван Дика:

$$E_c = E_m \left\{ 1 + \frac{1,25\vartheta}{1 - \frac{\vartheta}{0,74}} \right\}^2, \quad (4)$$

- уравнение Муни:

$$E_c = E_m \exp \frac{1,25\vartheta}{1 - \frac{\vartheta}{0,74}}, \quad (5)$$

- уравнение Сяо-Халпина:

$$E_c = E_m \frac{1 + A_k B_k \vartheta}{1 - B_k \vartheta}, \quad (6)$$

Как отмечают авторы [5] для эпоксидных композитов, наполненных порошкообразными наполнителями, наиболее точные результаты показывает уравнение Кернера. В то же время в данной модели учитывается не только объемное содержание наполнителя, но и его модуль упругости.

Для удобства расчетов обработка экспериментальных данных и расчет прогностических уравнений выполнялась при помощи системы электронных таблиц MS Excel, а результаты представлены в виде графиков.

3. Результаты и обсуждение

По результатам испытаний на растяжение были определены модуль упругости и прочность образцов. Усредненные значения экспериментальных данных представлены в таблице 2.

Из графиков на рисунке 3 видно, что с увеличением объемного содержания наполнителя для каждого наполнителя наблюдается плавное снижение прочности на растяжение. При этом, для каждого наполнителя присутствуют свои точки экстремума. При увеличении объемного содержания кварцевой муки (рисунок 2 а) и цемента (рисунок 2 в) до $\nu=0,4$ и $\nu=0,47$ происходит резкое снижение прочности на растяжение, а при $\nu=0,57$ прочность на растяжение резко увеличивается. С увеличением объемного содержания аэросила (рисунок 2 б) до $\nu=0,02$ прочность на растяжение повышается, а при увеличении от $\nu>0,02$ прочность начинает снижаться.

Таблица 2

Усредненные значения экспериментальных данных.

№ п/п	Состав	Объемное содержание наполнителя, ν	Средняя предельная нагрузка $F_{\text{макс}}$ (кН)	Средняя прочность на растяжение $R_{\text{макс}}$ (МПа)	Среднее значение модуля упругости, $E_{\text{ср}}$ (МПа)
1	Исходный состав (матрица)	0	0,64	42,01	2208
2	M25	0,18	0,75	44,91	3258

Окончание таблицы 2

3	M50	0,31	0,63	37,97	3922
4	M75	0,4	0,61	36,17	4318
5	M100	0,47	0,58	37,74	5247
6	M150	0,57	0,57	67,76	1182
7	A1	0,01	0,63	42,49	2062
8	A2,5	0,02	0,73	45,20	2465
9	A5	0,04	0,60	38,44	2344
10	A7,5	0,06	0,59	37,26	2226
11	Ц25	0,18	0,55	39,84	2933
12	Ц50	0,31	0,60	37,86	3697
13	Ц75	0,4	0,43	28,72	3652
14	Ц100	0,47	0,47	30,36	4707
15	Ц150	0,57	0,49	60,54	1222

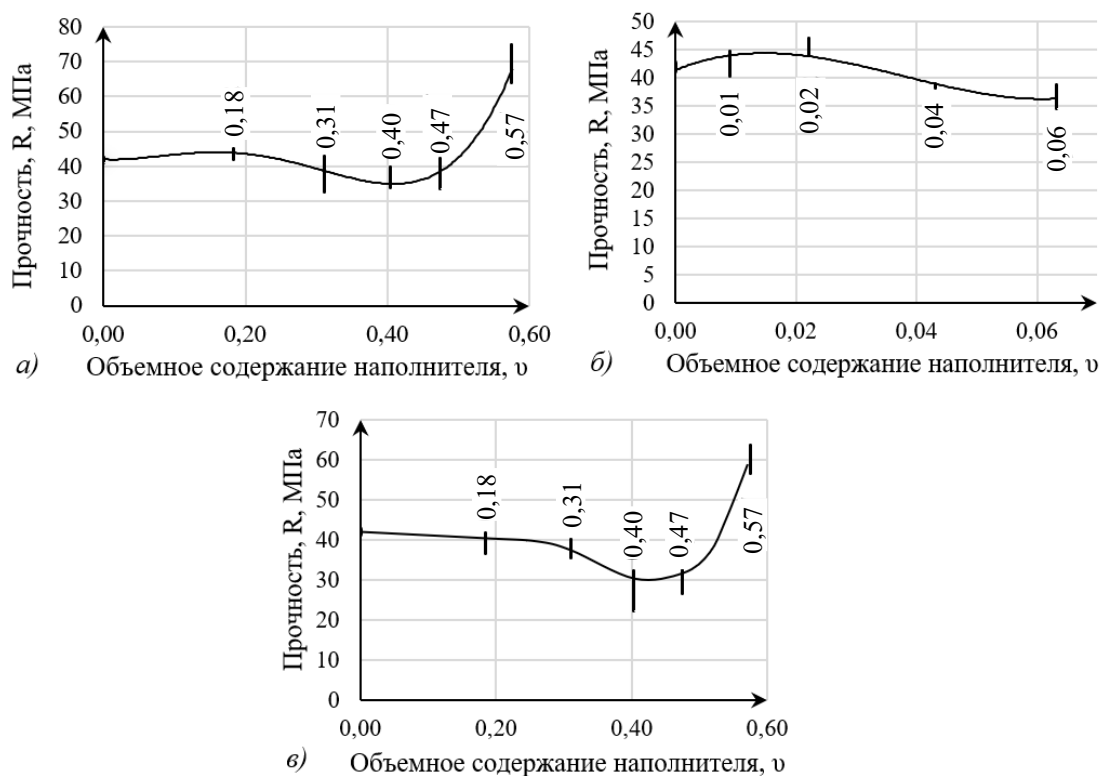


Рис. 2. Изменение прочности от объемного содержания наполнителя:

а) кварцевая мука; б) аэросил; в) цемент (иллюстрация авторов)

Fig. 2. The change in strength from the volume content of the filler:

а) quartz flour; б) aerosil; в) cement (illustration by the authors)

Введение кварцевой муки и цемента положительно влияет на модуль упругости эпоксидного адгезива (рисунок 3, 4). Однако при объемном содержании данных наполнителей $v=0,57$ наблюдается резкое снижение модуля упругости. Влияние аэросила на модуль упругости в выбранных пределах оказалось не велико (рисунок б). Наблюдается лишь не значительное повышение модуля упругости.

Для наглядности расчетные значения модуля упругости представлены на графиках наложением рядом с экспериментальной кривой. Как видно из графиков (рисунок 4, 5, 6) формула Эйнштейна позволяет адекватно моделировать модуль

упругости эпоксидного адгезива в зависимости от объемного содержания наполнителя. При этом данное линейное уравнение не может отражать точки экстремума. Таким образом, резкое снижение модуля упругости уравнением Эйнштейна не описывается. Следует отметить, что данное уравнение не учитывает модуль упругости самого наполнителя и кривая прогноза будет одинаковой для любых видов наполнителей при их одинаковых объемных долях в эпоксидном адгезиве.

Особый интерес вызывает прогностическая модель, описанная уравнением Кернера, так как включает в себя и модуль упругости наполнителя. При довольно малом объемном содержании наполнителя (для аэросила, рисунок 5) модели Эйнштейна и Кернера практически совпадают. Для больших долей наполнителей (кварцевая мука и цемент, рисунки 3 и 4) две прогностические модели отличаются. Уравнение Кернера для эпоксидного адгезива, наполненного кварцевой мукой, сходится только при $\nu=0,18$. С увеличением объемного содержания кварцевой муки более $\nu>0,18$ прогностическая кривая начинает отклоняться от экспериментальных значений в большую сторону. В случаи наполнения эпоксидного адгезива цементом уравнение Кернера дает хорошую сходимость.

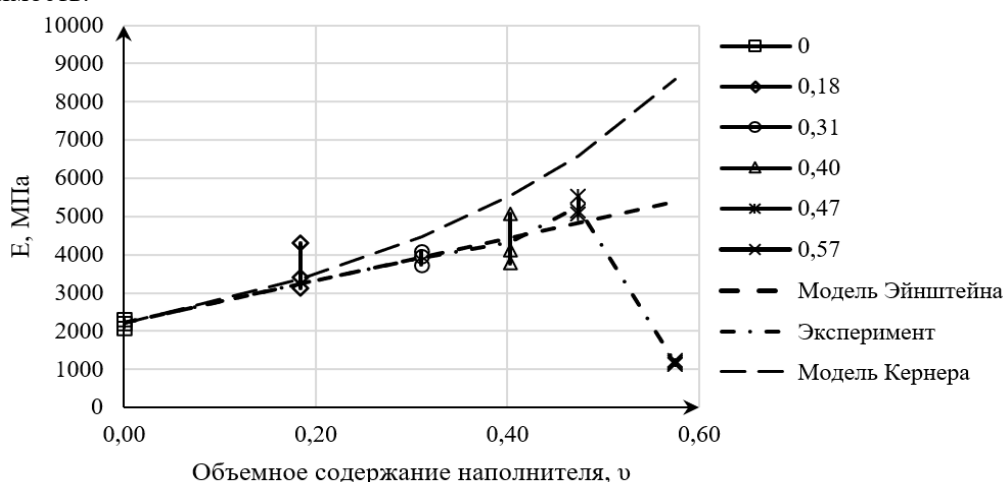


Рис. 3. Влияние объемного содержания кварцевой муки на модуль упругости (иллюстрация авторов)
 Fig. 3. The influence of the bulk content of quartz flour on the modulus of elasticity (illustration by the authors)

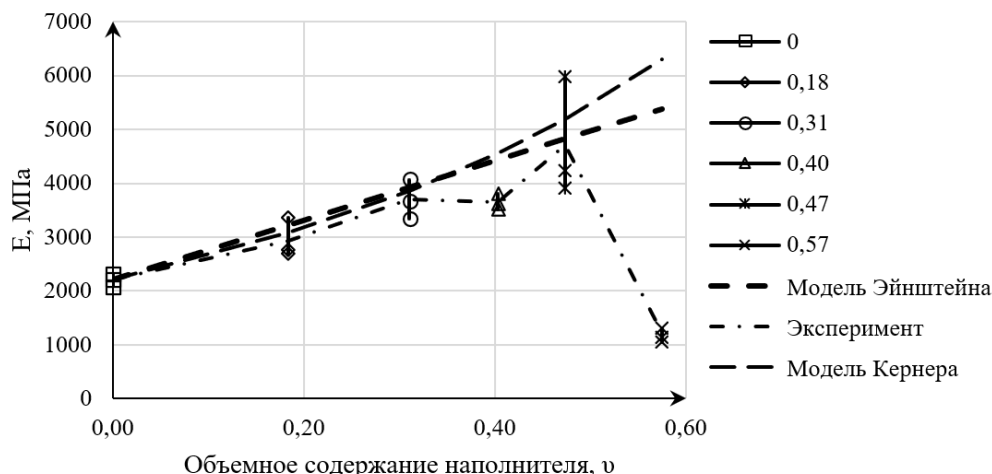


Рис. 4. Влияние объемного содержания цемента на модуль упругости (иллюстрация авторов)
 Fig. 4. The influence of the volume content of cement on the modulus of elasticity (illustration by the authors)

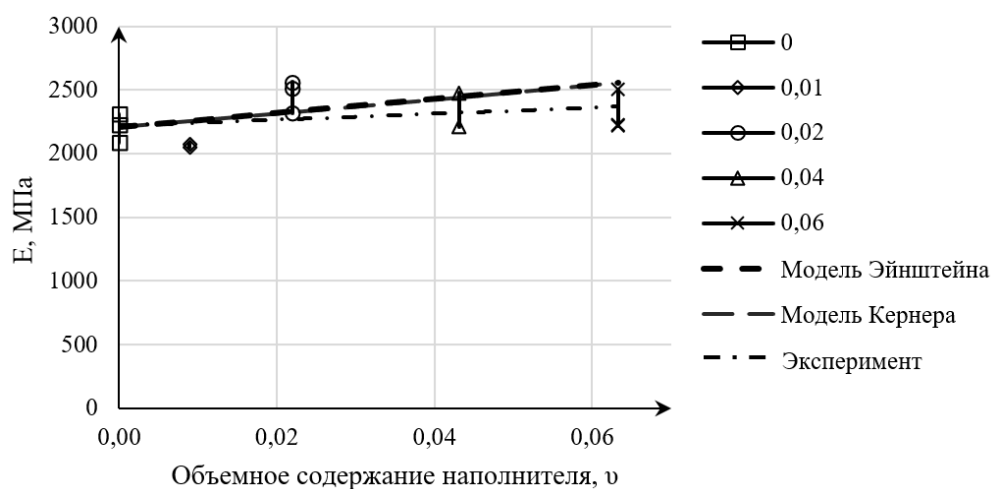


Рис. 5. Влияние объемного содержания аэросила на модуль упругости (иллюстрация авторов)

Fig. 5. The influence of the volume content of aerosil on the modulus of elasticity (illustration by the authors)

4. Заключение

1. Полученные результаты экспериментальных исследований показывают, что введение в состав таких порошкообразных наполнителей как кварцевая мука, цемент и аэросил позволяет повышать модуль упругости эпоксидных адгезивов. Однако при этом снижаются прочностные характеристики.

2. Существующие зависимости для прогнозирования модуля упругости в зависимости от объемного содержания выбранных наполнителей позволяют предварительно подобрать оптимальное соотношение компонентов для адгезива. При этом наиболее целесообразно и достаточно будет применения уравнения Эйнштейна. В то же время необходимо учитывать критические значения объемного содержания наполнителей более $v > 0,47$ при которых рассмотренные уравнения не работают.

Список литературы / References

1. Меркулов С. И., Есипов С. М., Есипова Д. В. Композитные системы внешнего армирования железобетонных конструкций // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. № 4. С. 39-48. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-39-48. [Merkulov S. I., Esipov S. M., Esipova D. V. Composite systems of external reinforcement of reinforced concrete structures // Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2022. No 4. P. 39-48. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-39-48.]
2. Е. Е. Шмойлов, Л. В. Чурсова, М. Ю. Федотов, А. А. Кальгин. Композитные системы внешнего армирования для усиления строительных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 1. С. 44-51. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.01.44-51. – EDN KNOEAE [E. E. Shmoilov, L. V. Chursova, M. Y. Fedotov, A. A. Kalgin. Composite external reinforcement systems for strengthening building structures // Industrial and civil engineering. 2024. No 1. P. 44-51. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.01.44-51. – EDN KNOEAE]
3. Окольникова Г.Э., Зуев С.С., Царева А.Ю. Использование композитных материалов при реконструкции зданий и сооружений // Системные технологии. 2020. № 34. С. 35-38. [Okolnikova G.E., Zuev S.S., Tsareva A.Y. The use of composite materials in the reconstruction of buildings and structures – System technologies. 2020. No 34. P. 35-38]
4. Johannes Tarigan, Randi Meka, Nursyamsi Nursyamsi. The usage of carbon fiber reinforcement polymer and glass fiber reinforcement polymer for retrofit technology building. Johannes Tarigan et al 2018 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 126 012024. DOI 10.1088/1755-1315/126/1/012024.

5. Layang, Samuel. (2021). Fiber reinforced polymer as a reinforcing material for concrete structures. *Balanga: Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*. 9. 41-48. 10.37304/balanga.v9i1.3276.
6. Chen, Yangzhou & Chen, Guoming. (2011). Fatigue test of carbon fiber used in repair and reinforcement on crack. 10.1109/MACE.2011.5988128.
7. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. М.: Стройиздат, 2007. 181 с. [Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. Moscow: Stroyizdat, 2007. 181 p.]
8. Эйнштейн А. Новое определение размеров молекул. — Собр. научн. тр., т. 3. - М.: Наука, 1966. С.75-91. [Einstein A. A new definition of the size of molecules. — Collection of scientific works, T. Z. - М.: Nauka, 1966. P.75-91]
9. Мэнсон Дж., Сперлинг Л. Полимерные смеси и композиты. - М.: Химия, 1979. 439 с. [Manson J., Sperling L. Polymer mixtures and composites. - М.: Chemistry, 1979. 439 p.]
10. Аскадский А. А., Ван С., Кондращенко В. И., Жданова Т. В., Мацевич Т. А. Прогнозирование модуля упругости композитов на основе смесей полимеров // *Строительные материалы*. 2020. № 7. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-60-66> [Askadskii A. A., Wang C., Kondrashchenko V. I., Zhdanova T. V., Matseevich T. A. Forecasting the elasticity modulus of composites based on polymer blends // // *Building materials*. - 2020. – No 7. – P. 60-66. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-60-66>]
11. Sakaguchi RL, Wiltbank BD, Murchison CF. Prediction of composite elastic modulus and polymerization shrinkage by computational micromechanics. *Dent Mater*. 2004 May;20(4):397-401. doi: 10.1016/j.dental.2003.11.003. PMID: 15019456.
12. Микитаев А. К., Козлов Г. В., Жанситов А. А., Хаширова С. Ю., Заиков Г. Е.. Прогнозирование и регулирование модуля упругости полимеров // *Вестник технологического университета*. 2016. Т.19, №1. [Mikitaev A. K., Kozlov G. V., Zhansitov A. A., Hashirova S. Yu., Zaikov G. E. Forecasting and regulation of the modulus of elasticity of polymers // *Bulletin of the Technological University*. 2016. Vol. 19, No 1]
13. Полимерные композиты с высокими упругопрочностными характеристиками / С. В. Курин, Л. Н. Шафигуллин, А. В. Лахно, А. А. Бобрышев. – Пенза : Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2016. – 124 с. – ISBN 978-5-9282-1405-0. – EDN ZRUAYX. [Polymer composites with high elastic strength characteristics / S. V. Kurin, L. N. Shafigullin, A.V. Lakhno, A. A. Bobryshev. – Penza : Penza State University of Architecture and Construction, 2016. – 124 p. – ISBN 978-5-9282-1405-0. – EDN ZRUAYX.]
14. Панов, А.Г. Моделирование дисперсно-наполненных композиционных материалов с комплексом специальных свойств / А.Г. Панов Л.Н. Шафигуллин, С.В. Курин // *Литейщик России*. 2011. №4. С. 26–29 [Panov, A.G. Modeling of dispersed-filled composite materials with a complex of special properties / A.G. Panov, L.N. Shafigullin, S.V. Kurin // *Foundry of Russia*. 2011. No 4. P. 26-29]
15. Stroganov V. F., Amel'chenko M. O., Mukhametrakhimov R. K. Increasing the Adhesion of Styrene–Acrylic Coatings Modified by Schungite Filler in Protection of Building Materials // *Polymer Science, Series D*. – 2022. – Vol. 15, No. 2. – P. 162-165. – DOI 10.1134/S1995421222020277. – EDN FJHLIU.
16. Старовойтова И. А., Семёнов А. Н., Зыкова Е. С., Хозин В. Г., Сулейманов А. М. Модифицированные клеевые связующие для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 1. Требования к клеям. Технологические характеристики // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 50–54. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-754-11-50-54>. [Starovojtova I.A., Semjonov A.N., Zyкова E.S., Khozin V.G., Sulejmanov A.M. Modified glue binders for systems of external reinforcement of building structures. Part 1. Requirements for glues.

- Technological characteristics. // Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2017. No. 11, P. 50–54.]
17. Сулейманов А. М., Зыкова Е. С., Старовойтова И. А., Семенов А. Н. Модифицированные клеевые связующие для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 2. Физико-механические характеристики клеев // Строительные материалы. 2017. № 12. С. 64–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-755-12>. [Sulejmanov A.M., Zyкова E.S., Starovojtova I.A., Semjonov A.N. Modified glue binders for systems of external reinforcement of building structures Part 2. Physical and mechanical characteristics of glue. // Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2017. No. 12, P. 64–67.]
18. Абдрахманова Л. А., Низамов Р. К., Бурнашев А. И., Хозин В. Г. Наномодификация древесной муки золями кремниевой кислоты // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2012. – Т. 4, № 3. – С. 56-67. – EDN OYXUCB. [Abdrakhmanova L. A., Nizamov R. K., Burnashev A. I., Khozin V. G. Nanomodification of wood flour with silicic acid sols // Nanotechnology in construction: scientific online journal. – 2012. – Vol. 4, No. 3. – pp. 56-67. – EDN OYXUCB.]

Информация об авторах

Шакиров Алмаз Райнурович, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: alma-94@mail.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, член-корр. Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

Старовойтова Ирина Анатольевна, канд. техн. наук, ООО «Научно-производственная фирма «Рекон», г. Казань, Россия

E-mail: irina-starovoitova@yandex.ru

Information about the authors

Almaz R. Shakirov, graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: alma-94@mail.ru

Alfred M. Sulejmanov, doctor of technical sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, corr.-m. Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

Irina A. Starovoitova, Ph.D. tech. Sciences, Research and Production Company "Rekon" LLC, Kazan, Russia

E-mail: irina-starovoitova@yandex.ru