УДК 691.175
Туйсина Екатерина Булатовна
аспирант
E-mail: katerina.tuysina@yandex.ru
Сулейманов Альфред Мидхатович
доктор технических наук, профессор
E-mail: sulejmanov@kgasu.ru
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Моделирование работы полимерных композиционных материалов в напряженно-деформированном состоянии под воздействием агрессивных сред. Часть 2. Метод прогнозирования долговечности полимерной композитной арматуры

Аннотация

Постановка задачи. Для инженерного расчёта конструкций из полимерных композиционных материалов необходима информация о длительном сопротивлении материала с учетом условий эксплуатации. Для оперативного получения этой информации необходимы ускоренные методы испытаний, позволяющие в короткие сроки определять необходимые параметры, входящие в расчетные формулы.

Целью исследования является разработка метода ускоренного определения долговечности полимерной композитной арматуры в цементных бетонах.

Результаты. Разработан экспериментальный метод и математическая формулировка прогнозирования долговечности полимерной композитной арматуры. Предлагаемый метод учитывает одновременное воздействие таких эксплуатационных факторов, как механические нагрузки, температура и химически активная среда.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в развитии методологии прогнозирования долговечности полимерных композиционных материалов в заданных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: полимерная композитная арматура, моделирование условий, старение, разрушение, длительная прочность, долговечность, прогнозирование.

Введение

Применение полимерных композиционных материалов в строительстве связано с решением ряда научно-технических проблем, связанных с обеспечением гарантированного срока службы конструкций, в который предполагается их применение. В случае полимерной композитной арматуры (ПКА) необходимо обеспечить гарантированный уровень основных служебных характеристик в условиях работы в бетоне. Согласно ГОСТ 31938-2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия» для определения щелочестойкости арматуры необходимо провести ускоренные испытания и определить остаточную прочность материала. Эти испытания проводятся при температуре 60^0С в ненапряженном состоянии образцов. Поскольку старение ПКМ в условиях эксплуатации является комплексным процессом, в испытаниях также необходимо учитывать не только наличие напряженно-деформированного состояния (НДС), но и синергетическое влияние действующих факторов: агрессивная среда, повышенные температуры, механические нагрузки, циклы «тепло-холод» и др., – по карте эксплуатации конструкции.

Влияние механической нагрузки на длительную прочность ПКМ при воздействии жидких сред

Особенно важно учитывать наличие механической нагрузки при испытании в жидкой агрессивной среде [1, 2]. Для ПКА учет одновременного воздействия НДС и щелочной среды необходимо, поскольку рабочая арматура в бетонных конструкциях воспринимает растягивающие усилия. Влияние растягивающей нагрузки на образцы полимерных композиционных материалов (ПКМ) при экспонировании в жидкой среде

было рассмотрено в одной из работ [3]. При длительном напряжении 25 % от предельной прочности материала, за счет увеличения свободного объема, происходит увеличение коэффициента диффузии и возрастает предельное влагонасыщение. При проникновении влаги в ПКМ происходит ослабление связей на границе волокно-связующее, появляются микротрещины [4-7], что приводит к снижению прочности.

В работе [8] было показано, что важным фактором является и уровень действующей нагрузки. При нагрузке более 80 % от предельной прочности время до разрушения образца зависит исключительно от величины действующей нагрузки. При усилии менее 60 % от предельной прочности, длительная прочность обусловлена замедляющимся во времени процессом накопления повреждений, который дополнительно накладывается на повреждения от внешних агрессивных факторов. Диапазон нагрузок 60-80 % является переходным.

Разработка метода прогнозирования длительной прочности ПКА

В отличие от стандартизированного метода определения щелочестойкости ПКА по ГОСТ 31938-2012, в данной работе испытания проводились при различных уровнях длительной статической нагрузки и без нее. Нагрузка прикладывалась методом продольного изгиба [9-15]. Метод и разработанный стенд для проведения длительных испытаний, подробно описаны в части 1 настоящей статьи. В качестве фактора, закономерно ускоряющего старение материала, также была использована температура. Всего было проведено два типа испытаний:

1 тип: образцы выдерживались в растворе щелочи (состав по ГОСТ 31938-2012) при различных температурах 20^0С, 40^0С, 50^0С, 60^0С, без НДС.

2 тип: образцы выдерживались в растворе щелочи (состав по ГОСТ 31938-2012) при температуре 50^0С, испытания проводились в НДС при трех уровнях деформаций, эквивалентных 0,2, 0,4, 0,6 от прочности ПКА при продольном изгибе (далее R).

Были получены зависимости изменения остаточной прочности на разных стадиях экспонирования образцов в ненапряженном (рис. 1) и напряженном (рис. 2) состояниях.

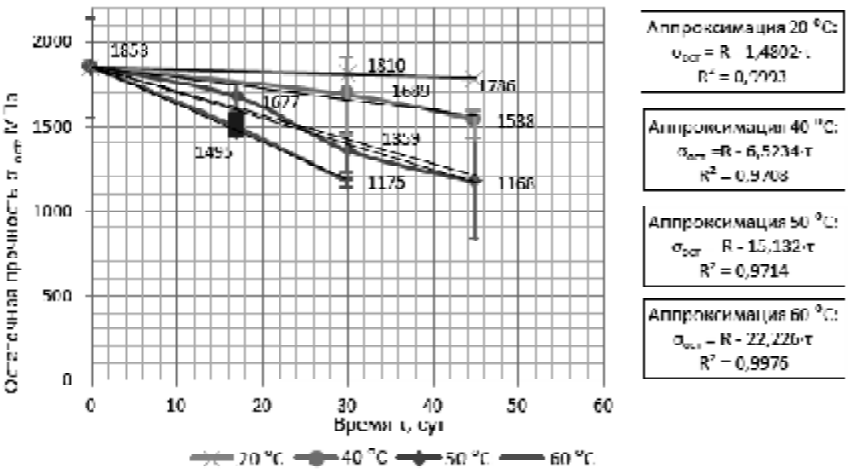


Рис. 1. Результаты эксперимента по 1 типу
(условия: различные уровни температуры и раствор щелочи)
с аппроксимацией линейными функциями (иллюстрация авторов)

Для всех испытаний закономерность изменения прочности с высоким уровнем корреляции описывается линейными функциями. Следовательно, во временном интервале, соответствующем времени проведения ускоренных испытаний, остаточная прочность может определяться функцией вида:

$$\sigma_{ост}=R-K_{дл}\cdot K_T\cdot\tau, \quad (1)$$

где R – исходная прочность материала, МПа;

$K_{дл}=f(m_{дл})$ – некоторая функция от уровня длительной нагрузки $m_{дл}$, определяющая влияние заданного НДС изменение исходной прочности материала;

$m_{дл}$ – уровень длительной нагрузки в долях от исходной прочности;
$K_T=g(T)$ – некоторая функция от температуры экспонирования Т, определяющая влияние температуры на изменение исходной прочности материала;
T – температура экспонирования образцов, °С;
τ – время экспонирования образцов.

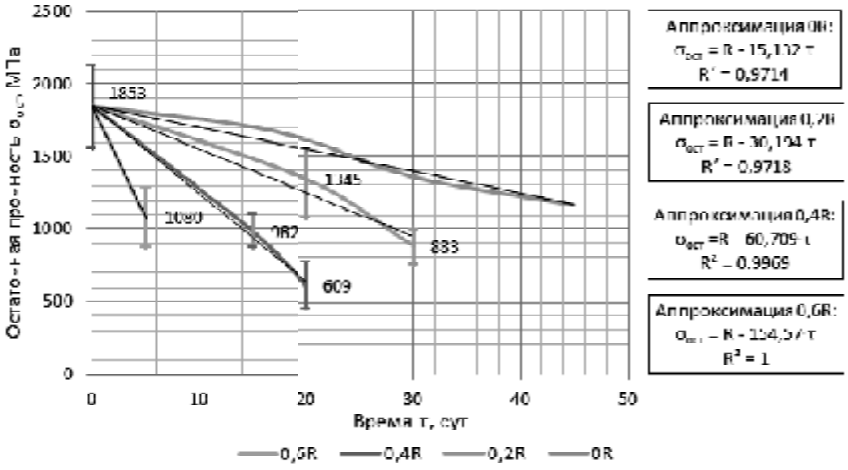
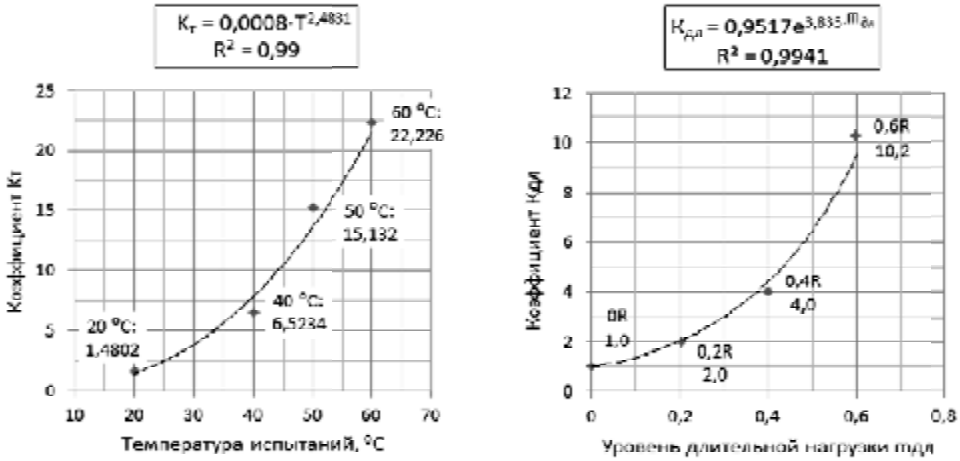


Рис. 2. Результаты эксперимента по 2 типу
(условия: различные уровни механической нагрузки, температура 50^{0}С, раствор щелочи)
с аппроксимацией линейными функциями (иллюстрация авторов)

Таким образом, задача определения закона изменения остаточной прочности сводится к определению функций $K_{дл}$ и K_T. Примем, что при уровне длительной нагрузки $m_{дл}$=0, функция $K_{дл}$=1. Тогда для определения функции K_T рассмотрим ее значения, полученные при испытании по типу 1:

K_T (T=20^{0}С)=1,4802; K_T (T=50^{0}С)=15,132;
K_T (T=40^{0}С)=6,5234; K_T (T=60^{0}С)=22,226.

Аппроксимируя полученные экспериментальные значения K_T определим функцию общего вида для испытываемого материала (рис. 3а) в интервале температур, при которых проводились исследования. Область определения может быть расширена без дополнительных исследований только в случае, если есть соответствующие обоснования.



а) б)

Рис. 3. а) Определение функции K_T; б) Определение функции $K_{дл.}$.
Точками обозначены значения коэффициентов,
полученные при аппроксимации экспериментальных значений прочности (иллюстрация авторов)

Для испытания по 1 типу, проводимом при температуре T=50^{0}С, коэффициент K_T=15,132. Тогда по значениям ($K_{дл}\cdot K_T$), полученным при аппроксимации данных испытаний по 2 типу, для различных уровней нагрузки найдем:

$$K_{дл}(m_{дл})=(K_{дл}\cdot K_T)/K_T(T=50^0\text{C});$$

$K_{дл}(m_{дл}=0)=1$; $K_{дл}(m_{дл}=0{,}4)=4{,}01$;

$K_{дл}(m_{дл}=0{,}2)=2$; $K_{дл}(m_{дл}=0{,}6)=10{,}02$.

Используя тот же подход, что и при определении функции для коэффициента K_T, проводится аппроксимация эмпирических значений коэффициента $K_{дл}(m_{дл})$ (рис. 3б).

Таким образом, прогнозирование остаточной прочности образцов ПКА, испытания, которые проводятся в условиях воздействия щелочной среды при температурах от 20^{0}С до 60^{0}С при нагрузках от 0 до 0,6R, можно проводить по формуле (1), где:

$K_T=0{,}0008\cdot T^{2,4831}$; $K_{дл}=0{,}9517\cdot e^{3,835\cdot mдл}$.

Следует отметить, что для относительно небольшого интервала можно считать коэффициенты K_T и $K_{дл}$ функциями одной переменной: температуры или уровня длительной нагрузки соответственно. Однако возможность применения описанного подхода для временного интервала, в котором закон изменения остаточной прочности для разных типов или условий испытаний происходит по разным законам и отличается от линейного, следует определять индивидуально.

Оценка погрешности значений длительной прочности

Закон изменения остаточной прочности для всех условий в двух сериях испытаний, спрогнозированный по описанному алгоритму, в интервале, соответствующем времени проведения эксперимента, дает результаты с погрешностью не более 10 %, что соизмеримо с разбросом экспериментальных данных. Сравнение кривых прогноза и эксперимента приведено на рис. 4-5 для 1 и 2 типов испытаний, соответственно.

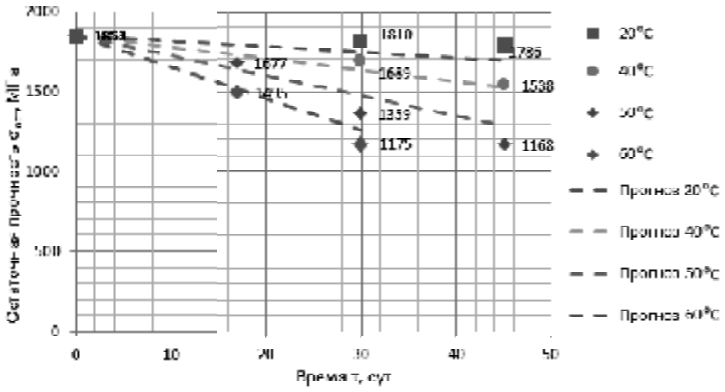


Рис. 4. Кривые прогноза и средние значения данных по испытаниям 1 типа типу (условия: различные уровни температуры и раствор щелочи) (иллюстрация авторов)

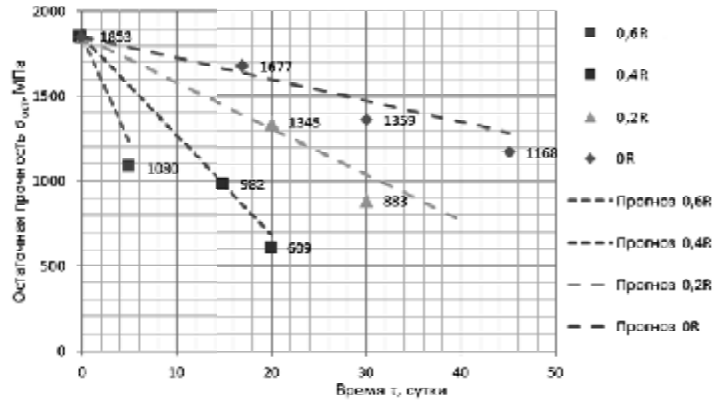


Рис. 5. Кривые прогноза и средние значения данных по испытаниям 2 типа (условия: различные уровни механической нагрузки, температура 50^{0}С, раствор щелочи) (иллюстрация авторов)

Перспективы применения предлагаемого метода оценки долговечности

В случае, когда разрушение образца происходи в процессе экспонирования, действующее напряжение в образце равно его остаточной прочности. Следовательно, образец, экспонируемый при $m_{дл}$ R в момент разрушения будет иметь $\sigma_{ост}=m_{дл}$ R. Основываясь на этом из уравнения (1) определим долговечность образца при заданных условиях:

$$\tau^* = \frac{R \cdot (1 - m_{дл})}{K_{дл} \cdot K_T}. \quad (2)$$

По этому соотношению можно определить время до разрушения образца для различного уровня длительных напряжений и разных температур, не вошедших в экспериментальную программу (рис. 6).

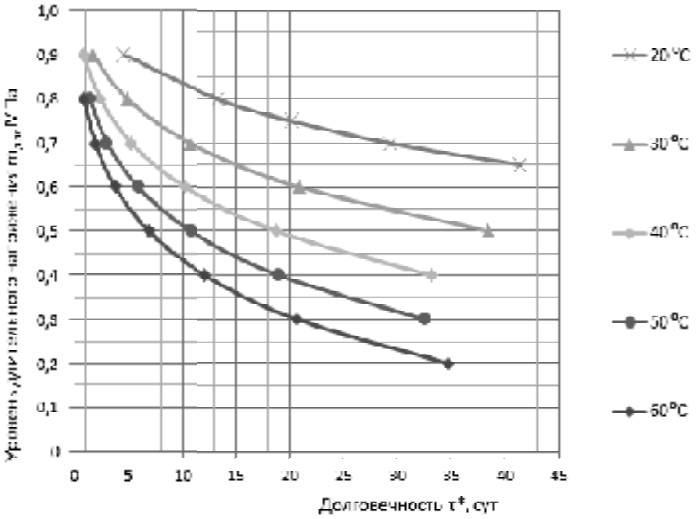


Рис. 6. Прогнозирование результатов эксперимента
(условия: различные уровни механической нагрузки и температуры, раствор щелочи)
(иллюстрация авторов)

Эти данные удобно использовать для планирования испытаний по другим типам: она позволят заранее определить прогнозируемую долговечность, таким образом, исследователь может на основании этого планировать длительность эксперимента и интервал времени для отслеживания кинетики изменения показателей старения.

Данные, найденные по формуле (2) и находящиеся во временном интервале, соответствующем времени проведения испытаний по типу 1 и 2 также могут быть использованы для прогнозирования по методу температурно-временной аналогии и напряженно-временной аналогии. Применительно к материалам, по составу и типу аналогичным ПКА, этот метод достаточно подробно описан Уржумцевым Ю.С. [16]. Результаты длительного контрольного эксперимента для сопоставления с результатами прогноза по методу аналогий по аналитически определенным кривым для различных температур и уровней напряжения находятся в стадии экспериментального освоения и в данной статье не затронуты.

Заключение

Описанный подход проведения ускоренных испытаний и метод обработки экспериментальных данных могут быть применены для оценки влияния НДС на прочностные характеристики ПКА при экспонировании в жидкой агрессивной среде. Преимущество такого подхода в том, что значительно сокращается количество типов испытаний, как следствие уменьшается количество образцов, требуется меньше времени и оборудования для получения необходимых данных о материале. Последующая обработка данных позволит спланировать новые испытания или сделать прогноз при помощи метода аналогий, т.е. позволит определить уровень допустимой длительной нагрузки для заданного срока службы конструкции.

Список библиографических ссылок

1. Helbling C., Karbhari V.M. Durability Assesment of Combined Environmental Eposure and Bending: Proc. of 7th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polym. Reinf. For Reinf. Concrete Structures / New Orlean, Loisiana, USA. 2005. Nov., 7010. P. 1397–1418.
2. Roylance D., Roylance M. Weathering of Faber-Reinforced Epoxy Composites // Polym. Eng. and Sci. 1978. v. 18. № 4. P. 249–254.
3. Kim R. H., Broutman L. J. Effect of Moisture and Stress on the Degradation of Graphite Fiber Reinforced Epoxies: Deform. Yield and Fract. Polym., 4th Int. Conf. / Cambridge. London, 1979. P. 231–235.
4. Ефимов В. А., Кириллов В. Н., Добрянская О. А., Николаев Е. В., Шведкова А. К., Коренькова Т. Г., Деев И. С. К вопросу о методике проведения натурных климатических испытаний полимерных композиционных материалов : сб. докладов восьмой научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2010» / ВИАМ. Москва, 2010. С. 102–106.
5. Анискевич К. К., Курземниекс А. Х., Янсон Ю. О. Исследование влияния длительного воздействия температуры и влаги на упругие свойства и структуру органопластика // Механика композиционных материалов. 1985. № 4. С. 620–623.
6. Reynolds T. G. Accelarated Tests of Enviromental Degradation in Composite Materials: M.S. Thesis / University of Bristol. Bristol, UK. 1998. 177 p.
7. Вапиров Ю. М., Кривонос В. В., Старцев О. В. Интерпретация аномального изменении свойств углепластика КМУ-1у при старении в разных климатических зонах // Механика композиционных материалов. 1994. Т. 30. № 2. С. 266–273.
8. Булманис В. Н., Ярцев В. А., Кривонос В. В. Работоспособность конструкций из полимерных композитов при воздействии статических нагрузок и климатических факторов // Механика композиционных материалов. 1987. № 5. С. 915–920.
9. Арнаутов А. К., Тарнопольский Ю. М. Продольный изгиб как метод определения изгибной прочности композитных материалов // Механика композитных материалов. 2004. Т. 40. № 1. С. 25–42.
10. Савин В. Ф., Блазнов А. Н. Метод определения долговременной прочности стеклопластиковой арматуры // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник. 2001. С. 214–219.
11. Савин В. Ф., Волков Ю. П., Луговой А. Н., Блазнов А. Н., Хе А. И. Продольный изгиб как средство контроля механических характеристик композиционных конструкционных материалов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник. 2002. С. 167–172.
12. Киселев Н. М., Савин В. Ф., Блазнов А. Н. Усталостная прочность стержней из композиционных материалов при продольном изгибе и растяжении: доклады VII Всероссийской научно-практической конференции 21-23 мая 2008 г. «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья» / БТИ АлтГТУ. Бийск, 2008. С. 137–142.
13. Блазнов А. Н., Волков Ю. П., Луговой А. Н., Савин В. Ф., Хе А. И. Исследование деформации стеклопластиковых стержней при продольном изгибе // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник. 2003. С. 180–185.
14. Петров М. Г. Анализ прочности и долговечности однонаправленного стеклопластика с позиций кинетической концепции разрушения // Механика композиционных материалов и конструкций. 2003. Т. 9. № 3. С. 376–397.
15. Волков Ю. П., Луговой А. Н., Савин В. Ф., Хе А. И., Блазнов А. Н. Метод определения механических характеристик стержней по результатам испытаний на продольный изгиб // Заводская лаборатория. 2004. Т. 70. № 9. С. 266–268.
16. Уржумцев Ю. С. Прогнозирование длительного сопротивления полимерных материалов. М. : Наука, 1982. 222 с.

Tuisina Ekaterina Bulatovna
post-graduate student
E-mail: katerina.tuysina@yandex.ru
Suleimanov Alfred Midhatovich
doctor of technical sciences, professor
E-mail: sulejmanov@kgasu.ru
Kazan State University of Architecture and Engineering
The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Simulation of polymer composite materials in the stress-strain state under the influence of aggressive media. Part 2. Method for predicting the durability of fiber reinforced polymer

Abstract

Problem statement. For the structural calculations of constructions with fiber reinforced plastic materials (FRP), you need to know the long-term resistance in application conditions of the FRP. For quick information on durability FRP accelerated test methods are needed. These methods give you all needed information about material for the short time.

The aim of the research is to develop a method for the accelerated determination of the durability of FRP bars for reinforcement of concrete.

Results. A test method for the long-term strength and a mathematical formulation of predicting the durability of FRP bars have been developed. The proposed method takes into account the simultaneous effects of operational factors such as mechanical loads, temperature, and a chemically active medium.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry consists in the development of a methodology for predicting the durability of polymer composite materials.

Keywords: polymer composite reinforcement, modeling of conditions, aging, destruction, long-term strength, durability, prediction, corrosion environment.

References

1. Helbling C., Karbhari V. M. Durability Assesment of Combined Environmental Eposure and Bending: Proc. of 7th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polym. Reinf. For Reinf. Concrete Structures / New Orlean, Loisiana, USA. 2005. Nov., 7010. P. 1397–1418.
2. Roylance D., Roylance M. Weathering of Faber-Reinforced Epoxy Composites // Polym. Eng. and Sci. 1978. V.18, № 4. P. 249–254.
3. Kim R. H., Broutman L. J. Effect of Moisture and Stress on the Degradation of Graphite Fiber Reinforced Epoxies: Deform. Yield and Fract. Polym., 4th Int. Conf. / Cambridge. London, 1979. P. 231–235.
4. Efimov V. A., Kirillov V. N., Dobryanskaya O. A., Nikolaev E. V., Shvedkova A. K., Korenkova T. G., Deev I. S. On the issue of the method of conducting full-scale climatic tests of polymer composite materials: dig. of art of the eighth scientific conference on hydroaviation «Gidroaviasalon-2010» / VIAM. Moscow, 2010. P. 102–106.
5. Aniskevich K. K., Kurzemnieks A. Kh., Yanson Yu. O. Study of the effect of prolonged exposure to temperature and moisture on the elastic properties and structure of organoplastic // Mechanics of composite materials. 1985. № 4. P. 620–623.
6. Reynolds T. G. Accelarated Tests of Enviromental Degradation in Composite Materials: M.S. Thesis / University of Bristol. Bristol, UK. 1998. 177 p.
7. Vapirov Yu. M., Krivonos V. V., Startsev O. V. Interpretation of the anomalous change in the properties of carbon fiber CMU-1u during aging in different climatic zones // Mekhanika kompozitsionnykh materialov. 1994. t. 30, № 2. P. 266–273.

8. Bulmanis V. N., Yartsev V. A., Krivonos V. V. Efficiency of structures made of polymer composites under the influence of static loads and climatic factors // Mekhanika kompozitsionnykh materialov. 1987. № 5. P. 915–920.
9. Arnautov A. K., Tarnopolsky Yu. M. Longitudinal bending as a method for determining the bending strength of composite materials // Mekhanika kompozitsionnykh materialov. 2004. V. 40. № 1. P. 25–42.
10. Savin V. F., Blaznov A. N. Method for determining the long-term strength of fiberglass reinforcement // Izmereniya, avtomatizatsiya i modelirovaniye v promyshlennosti i nauchnykh issledovaniyakh: Interuniversity collection. 2001. P. 214–219.
11. Savin V. F., Volkov Yu. P., Lugovoy A. N., Blaznov A. N., Heh A. I. Longitudinal bending as a means of controlling the mechanical characteristics of composite structural materials // Izmereniya, avtomatizatsiya i modelirovaniye v promyshlennosti i nauchnykh issledovaniyakh: Interuniversity Collection. 2002. P. 167–172.
12. Kiselev N. M., Savin V. F., Blaznov A. N. Fatigue strength of rods made of composite materials under longitudinal bending and stretching: reports of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference on May 21-23, 2008 «Technique and Technology of Production of Thermal Insulating Materials from Mineral Raw Materials» / BTI AltGTU. Biysk, 2008. P. 137–142.
13. Blaznov A. N., Volkov Yu. P., Lugovoy A. N., Savin V. F., Heh A. I. Investigation of the deformation of fiberglass rods at buckling // Izmereniya, avtomatizatsiya i modelirovaniye v promyshlennosti i nauchnykh issledovaniyakh: Interuniversity collection. 2003. P. 180–185.
14. Petrov M. G. Analysis of strength and durability of unidirectional fiberglass from the standpoint of the kinetic concept of fracture // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy. 2003. Vol. 9. № 3. P. 376–397.
15. Volkov Yu. P., Lugovoy A. N., Savin V. F., Heh A. I., Blaznov A. N. Method for determining the mechanical characteristics of rods according to the results of longitudinal bending tests. // Заводская лаборатория. 2004. Т. 70. № 9. P. 266–268.
16. Urzhumtsev Yu. S. Prediction of long-term resistance of polymeric materials. M. : Nauka, 1982. 222 p.