

УДК 691.175:519.7

СИНТЕЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЗИЦИЙ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Гарькина И.А., Данилов А.М., Сорокин Д.С.

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры
и строительства», Пенза, e-mail: fmatem@pguas.ru, regas@pguas.ru

Предлагается метод проектирования композиционных материалов для защиты от радиации на основе их рассмотрения как сложных многоцелевых систем с регулируемыми характеристиками. Приводится алгоритм синтеза композита с позиций классической теории оптимального управления, который включает: техническую постановку задачи; разработку критериев оптимизации; построение математической модели объекта как совокупности частных моделей. Метод оптимизации определяется после полной формализации задачи синтеза. Предусматривается возможность корректировки и упрощения как всей математической задачи, так и отдельных ее элементов. Уточнение сформулированной технической задачи осуществляется после решения математической задачи, а итерационный процесс может повторяться до достижения заданной точности. Показывается, что синтез материала состоит в переводе объекта из некоторого начального в конечное состояние при принятых допустимых управлениях и принятых критериях качества. Приводится пример.

Ключевые слова: композиционные материалы, защита от радиации, системный анализ, композиты как сложные системы, кинетические процессы, управление качеством, принцип Парето

SYNTHESIS OF COMPOSITE MATERIALS FROM THE STANDPOINT OF CLASSICAL OPTIMAL CONTROL THEORY

Garkina I.A., Danilov A.M., Sorokin D.S.

Penza state university of architecture and construction,
Penza, e-mail: fmatem@pguas.ru, regas@pguas.ru

We propose a method of designing composite materials for radiation protection based on their consideration as complex multifunctional system with adjustable parameters. An algorithm for synthesis of composite products with classical optimal control theory, which includes: technical formulation of the problem; develop criteria for optimization; construct a mathematical model of the object as a set of partial models. Optimization method is determined after a complete formalization of the problem of synthesizing. Provides for the possibility of adjusting and simplifying mathematical problem and its individual elements. Clarification formulated technical problem is solved after solving a mathematical problem, and iterative process can be repeated until the specified accuracy. It is shown that the synthesis of the material is to convert the object from an initial to a final state under the assumed admissible controls and accepted quality criteria. An example is given.

Keywords: composite materials, radiation protection, system analysis, composites as complex systems, kinetic processes, quality management, the Pareto principle

Существует ряд подходов к рационализации подбора рецептуры и технологии производства композиционных материалов. В общем случае выбор сводится к задачам оптимизации, которые успешно решены в теории оптимального управления сложными техническими системами. К сожалению, авторам известны лишь редкие случаи использования методов теории управления и системного анализа к разработке композитов [1, 5, 7, 9, 12]. Ниже предлагается подход к синтезу композиционных материалов с регулируемой структурой и свойствами с позиций классической теории оптимального управления. Последовательность этапов синтеза композиционных материалов как сложных систем [7] приводится на рис. 1, в числе основных выделяются:

- техническая постановка задачи и выбор критериев оптимизации;
- построение математических моделей управления в форме системы операторных уравнений (дифференциальных, интеграль-

ных, разностных, дифференциально-разностных, дифференциально-интегральных и т.д.).

Математическая модель и пути ее построения определяются степенью изученности рассматриваемой системы, наличием опыта разработки аналогичных систем, полноты знания физических процессов, характеризующих поведение объекта, и осуществляются на основе теоретических исследований физических процессов в системе, логического анализа, идентификации по данным нормальной эксплуатации. Выбираются компоненты вектора управления, параметры системы и возмущения; устанавливаются фазовые координаты; определяется пространство состояния объекта [2, 8]. При разработке оптимальных систем указываются ограничения на компоненты вектора управления и фазовые координаты. Так, ограничения на фазовые координаты определяют принадлежность вектора состояния некоторому замкнутому множеству точек n -мерного пространства (определяют

свойства материала). Указываются начальные и краевые условия, осуществляется выбор критерия для оценки качества управления. Модельные исследования являются

исходной информацией для уточнения технической задачи, и итерационный процесс может повторяться до достижения заданной точности.

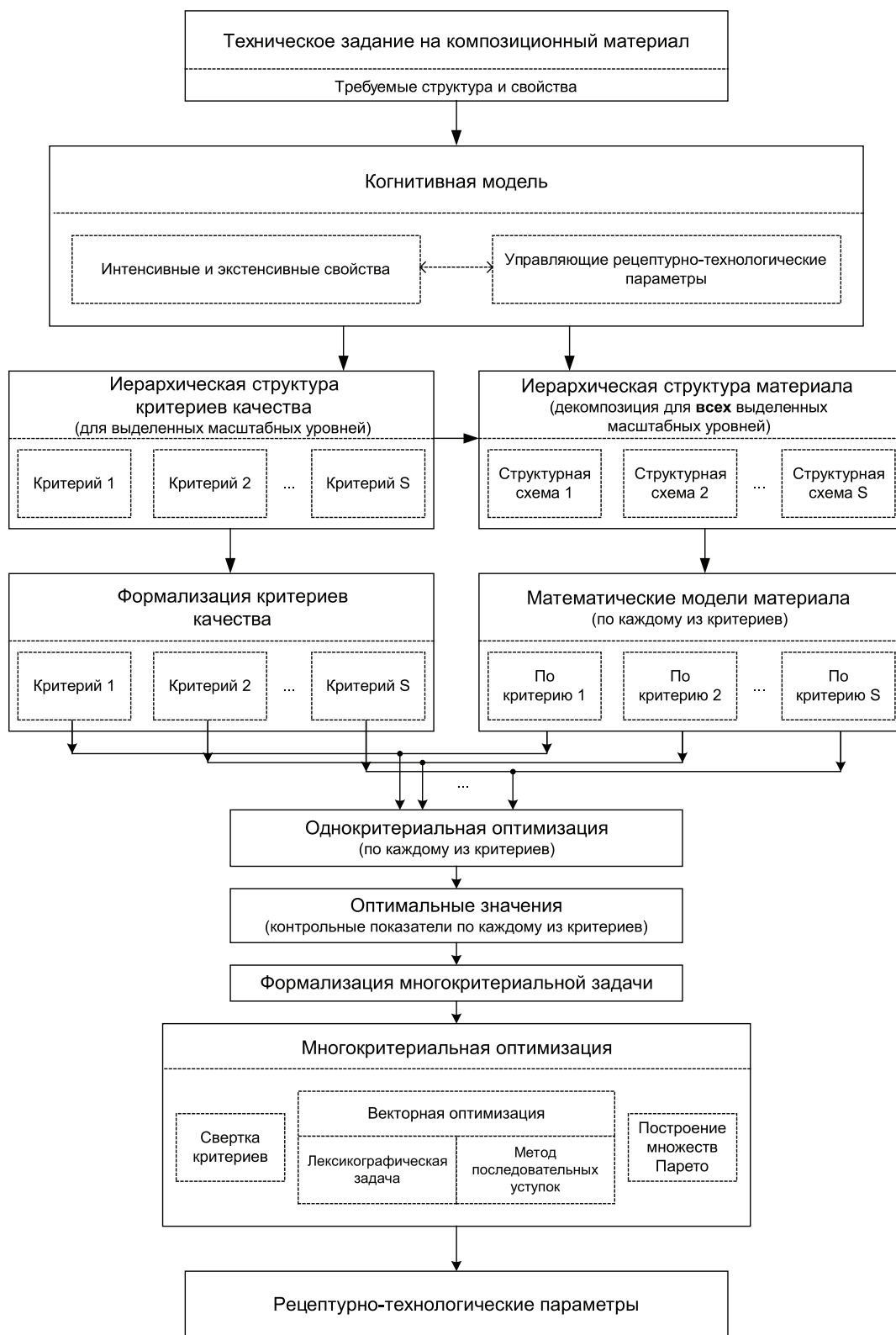


Рис. 1

Как видим, при проектировании композитов как сложных многоцелевых систем возникают проблемы скаляризации нескольких показателей качества; определения иерархической структуры множества критериев с расстановкой приоритетов; области достижимости, построения множества Парето и т.д. [3, 4, 7].

Не останавливаясь на всем комплексе затронутых вопросов, ограничимся использованием принципа Парето (сформулирован Джураном; состоит в предположении, что большая часть результатов вызывается относительно небольшим числом причин). В основном принцип Парето используется для анализа по специально построенным диаграммам возможных источников брака с целью последующего совершенствования технологии производства. Применительно к технологии по принципу Парето «80% потерь из-за брака или переделок проистекает вследствие 20% причин». Точно так же Парето обнаружил, что 80% благосостояния контролируется 20% людей. И вообще, в количественной формулировке 80% всех возникающих проблем происходит из-за 20% исходных материалов, уровня подготовки операторов, работы машин и т.д.

Принцип Парето наглядно характеризует взаимоотношения «причины – результаты» в системе и является одним из наиболее используемых инструментов принятия решений.

Ниже приводится пример использования диаграмм и принципа Парето для управления качеством по виду кинетических процессов формирования требуемых структуры и свойств эпоксидных композитов (ЭК) повышенной плотности для защиты от радиации с использованием отходов стекольной промышленности. По Парето начальные 20% определяют последующие 80% времени выхода контролируемого параметра на эксплуатационное значение.

При скалярном управлении $y(t)$ часто оптимизация осуществляется на основе функционала

$$I = \int_0^T [\alpha y^2(t) + \beta \dot{y}^2(t)] dt.$$

В частном случае при $\alpha = 1, \beta = 0$

$$I = I_1 = \int_0^T y^2(t) dt$$

и оптимизация обеспечивает перевод объекта из начального в конечное состояние на промежутке $[0, T]$ с минимальной энергией управления.

Учитывая, что управление структурой и свойствами материала осуществляется изменением соответствующих рецептурно-технологических параметров, естественен подход к синтезу материалов как к задаче управления [10, 11]. Воспользуемся этой аналогией при синтезе материалов.

Обычно структура композита в большей степени зависит от скорости расхода энергии, чем от ее величины, сообщенной системе. В связи с этим наряду с I_1 рассмотрим функционал

$$I = I_2 = \int_0^T \dot{x}^2(t) dt$$

и кумулятивную кривую $I_2(t)$. Как оказалось, для всех основных кинетических процессов $x(t), t \in [0, T]$ выполняется условие

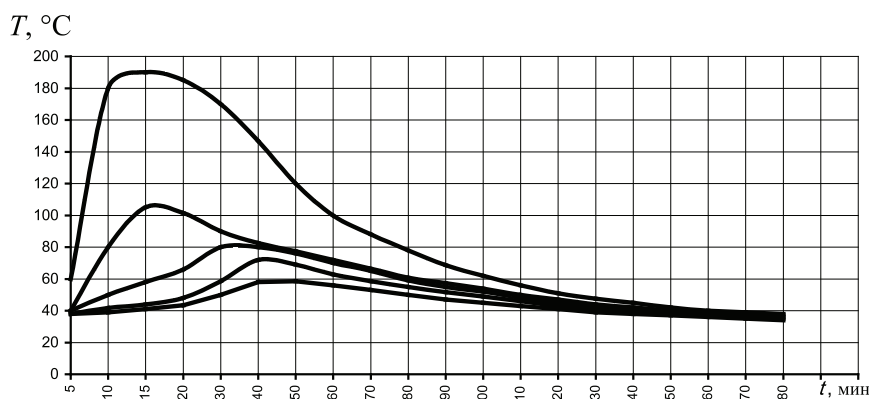
$$I(0,2T) \geq 0,8 I(T),$$

что подтверждает возможность использования принципа Парето при оценке формирования физико-механических характеристик материалов. А именно, структура и свойства материала на 80% определяются начальными 20% длительности выхода контролируемого параметра на эксплуатационное значение.

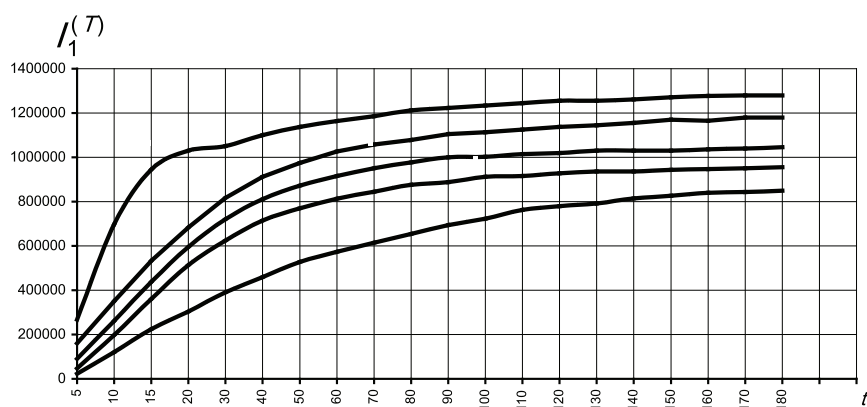
На рис. 2, 3 приводятся кинетические процессы $x(t)$ и соответствующие им кумулятивные кривые тепловыделения и набора прочности для указанных ЭК. Отметим также, что из сравнения кумулятивных кривых $I_1(t)$ и $I_2(t)$ следует, что при использовании диаграмм Парето необходимо исходить из функционала I_2 .

Как подтвердили многочисленные исследования, применение принципа Парето значительно облегчает и разработку рецептуры (содержание ингредиентов, гранулометрический состав и т.д.): позволяет выделить элементы в рецептуре, определяющие в основном эксплуатационные характеристики материала. Для рассматриваемых ЭК прочность и плотность в основном определяются степенью наполнения и видом модификатора.

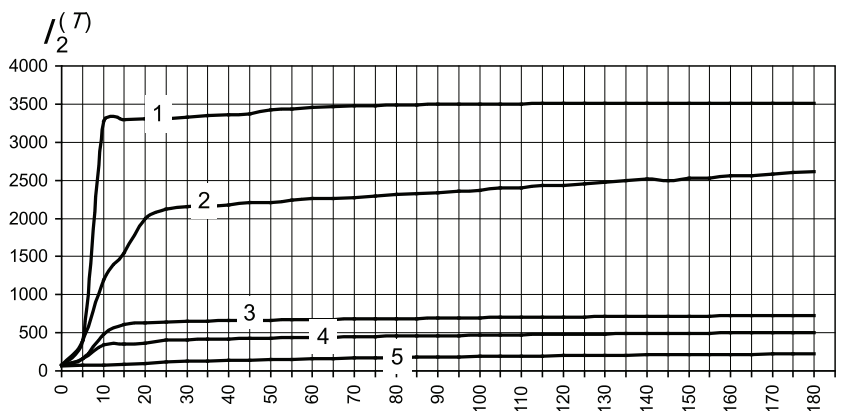
Принцип Парето можно использовать и для итеративного способа улучшения качества материала на основе последовательного построения на каждом этапе соответствующих диаграмм Парето.



а



б



в

Рис. 2. Зависимость температуры саморазогрева при полимеризации
эпоксидного композита, $I_1^{(T)}$ и $I_2^{(T)}$ от t , мин:

1 – незаполненная смола; 2 – П/Н = 1/5; 3 – П/Н = 1/10; 4 – П/Н = 1/15; 5 – П/Н = 1/20

На основе предложенного подхода к синтезу материалов как к задаче управления осуществлялась разработка эпоксидного композиционного материала, обладающего повышенными защитными свойствами от воздействия ионизирующих излучений. Оптимизация структуры и свойств мате-

риала производилась на основе выбора параметров кинетических процессов формирования его физико-механических характеристик (радиационной стойкости, набора прочности, тепловыделения, усадки и др.), описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями [5].

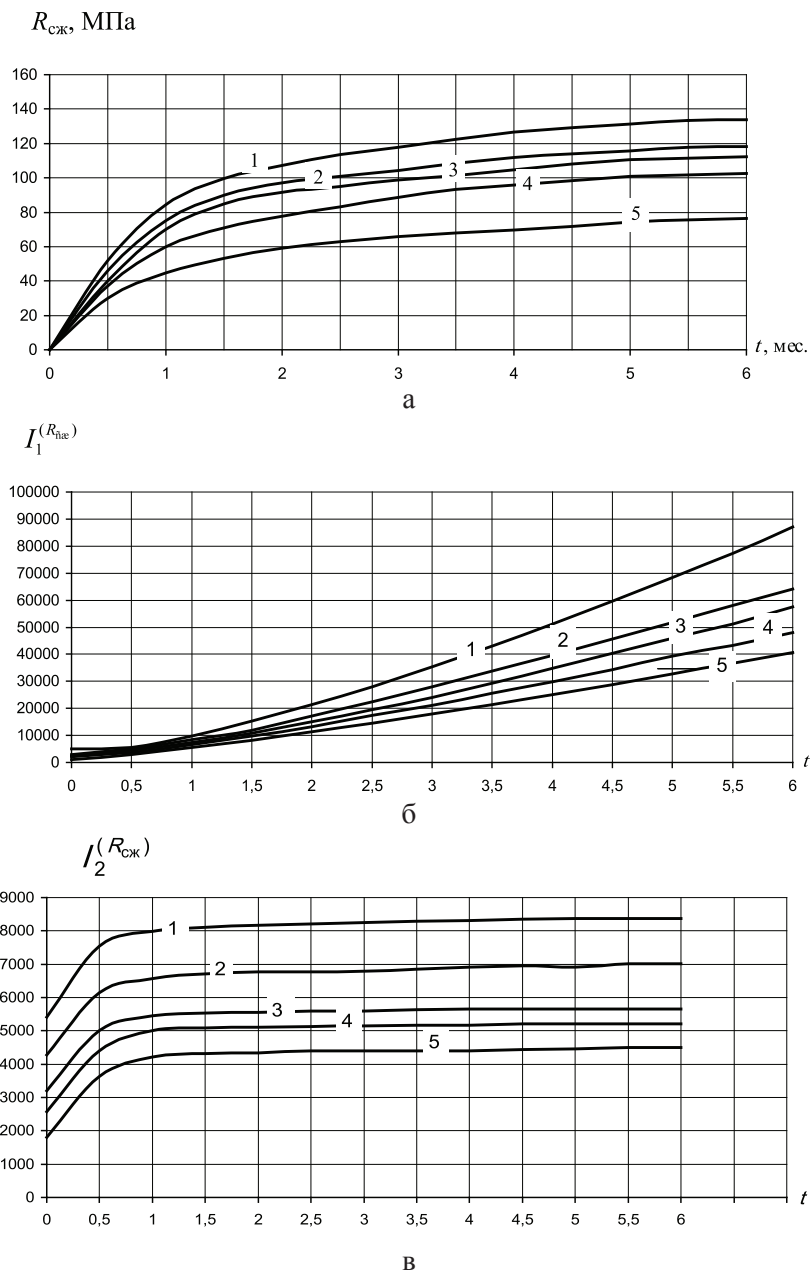


Рис. 3. Зависимость $R_{сж}$, $I_1^{(R_{вне})}$ и $I_2^{(R_{сж})}$ от t , мес.:
 1 – $\Pi/H = 1/15$; 2 – $\Pi/H = 1/10$; 3 – $\Pi/H = 1/10$ и ММ; 4 – $\Pi/H = 1/20$; 5 – $\Pi/H = 1/5$

Список литературы

1. Альбакасов А.И., Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. Оптимизация систем со сложной иерархией // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 2 (31). – С. 324–328.
 2. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Декомпозиция динамических систем в приложениях // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 95–10.
 3. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Моделирование с позиций управления в технических системах // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 2 (16). – С. 138–142.
 4. Гарькина И.А., Данилов А.М. Опыт разработки композиционных материалов: некоторые аспекты математиче-

ского моделирования // Известия вузов. Строительство. – 2013. – № 8 (656). – С. 28–33.
 5. Гарькина И.А., Данилов А.М. Управление качеством материалов со специальными свойствами // Проблемы управления. – 2008. – № 6. – С. 67–74.
 6. Гарькина И.А., Данилов А.М. Управление в сложных технических системах: методологические принципы управления // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1 (12). – С. 39–43.
 7. Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. Строительные материалы как системы // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С. 55–58.
 8. Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. Когнитивное моделирование при синтезе композиционных

материалов как сложных систем // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 3/4. – С. 30–37.

9. Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В., Смирнов В.А. Преодоление неопределенностей целей в задачах многокритериальной оптимизации на примере разработки сверхтяжелых бетонов для защиты от радиации // Строительные материалы. – 2006. – № 8. – С. 23–26.

10. Гарькина И.А., Данилов А.М., Смирнов В.А. Управление структурой и свойствами композитов для защиты от радиации // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 2.3 (32). – С. 340–344.

11. Данилов А.М., Гарькина И.А. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения // Известия вузов. Строительство. – 2011. – № 1. – С. 80–85.

12. Системный анализ в строительном материаловедении: монография / Ю.М. Баженов, И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев – М.: МГСУ: Библиотека научных разработок и проектов, 2012. – 432 с.

References

1. Albakasov A.I., Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V. Optimization of systems with complex hierarchy // Journal of Civil Engineers. 2012. no. 2 (31). pp. 324–328.

2. Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. Decomposition of dynamical systems in applications // Regional architecture and construction. 2013. no. 3. pp. 95–10.

3. Budylna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. Modeling from the positions of management in technical systems // Regional architecture and construction. 2013. no. 2 (16). pp. 138–142.

4. Garkina I.A., Danilov A.M. Experience in the development of composite materials: some aspects of mathematical modeling // Proceedings of the universities. Construction. 2013. no. 8 (656). pp. 28–33.

5. Garkina I.A., Danilov A.M. Quality management of the materials of special properties // Control Sciences. 2008. no. 6. pp. 67–74.

6. Garkina I.A., Danilov A.M. Management in complex technical systems: methodological principles of management // Regional architecture and construction. 2012. no. 1 (12). pp. 39–43.

7. Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev Y.V. Building materials as systems // Building materials. 2006. no. 7. p. 55–58.

8. Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev Y.V. Cognitive modeling of composite materials for the synthesis of complex systems as // Proceedings of the universities. Construction. 2009. no. 3/4. pp. 30–37.

9. Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev Y.V., Smimov V.A. Overcoming uncertainty goals multicriteria optimization problems by the example of superheavy concrete for protection against radiation // Building materials. 2006. no. 8. pp. 23–26.

10. Garkina I.A., Danilov A.M., Smirnov V.A. Management of structure and properties of composites for protection against radiation // Control systems and Information technology. 2008. no. 2.3 (32). pp. 340–344.

11. Danilov A.M., Garkina I.A. Methodology for the design of complex systems at development of special materials // Proceedings of the universities. Construction. 2011. no. 1. pp. 80–85.

12. Systems analysis in building materials: monograph / Bazhenov Yu.M. Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V. M.: Moscow State University of Civil Engineering: Library of scientific developments and projects. 2012. 432 p.

Рецензенты:

Логанина В.И., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Управление качеством и технологии строительного производства», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза;

Кошев А.Н., д.х.н., профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза.

Работа поступила в редакцию 05.08.2014.