

properties, including methods of NDT, quantitative metallography analysis of mathematical models based mainly on statistical data showed that these methods are relatively expensive and often produce results that diverge from the requirements of the guests. This is due to the fact that to realize the most obvious, a deterministic approach used to evaluate the mechanical properties of the rolls, based on the analysis of causal connections and relationships, it is not possible, because the technology of production of rolls is a multiparameter and multicriterion. Consequently, the quality of the metal exerts a substantial influence a large number of technological parameters (chemical composition, alloying elements, cooling conditions, spreads thickness, shape, casting process, and other parameters) affecting the formation of the structure, highly interconnected. Even a slight change of some of them significantly alter the properties of the metal in a relatively wide range. The task of identifying the desired product quality is further complicated by the fact that the physical nature certain quality criteria tend to contradict each other, i.e., improving one criterion, we often worsens the other - for example, strength, ductility, toughness, brittleness, and others. Most of the criteria that characterize the performance and efficiency of technology identified acceptable, relatively small intervals, providing a relatively small effect on the magnitude of these criteria. This is probably based on the fact that the developers of the process in an effort to sustain it, as far as possible in one's chosen field of technological parameters, numerical values of the restricted criteria that characterize its performance and efficiency. The area where these criteria are minimum contradict each other, we call the area of compromise quality criteria. «Just between opposites may be a compromise».

Given the foregoing, the development and research of a method for determining the area of compromise quality criteria multicriteria technologies is an actual scientific and practical problems of modern materials. This approach will allow the adjustment of the mechanical properties of metal products during their production.

Experience has shown that in practice, this approach is particularly useful when foresight chemical composition of the product and its mechanical properties in a production environment.

## REFERENCES

1. Bolshakov Wade. I. Pro nepovnoty formalnoy aksiomatiki v zadachax identificachii structure metaly / Wade. I. Bolshakov, I. V. Bolshakov, Yu. I. Dubrov // Visnik NAN Ukrainu. – 2014. – № 4. – S. 55 – 59.
2. Bolshakov V. I. Pyti reshenia zadach identificachii achestvenux charakteristik materialov na osnove expertnux systems / V. I. Bolshakov, Yu. I. Dubrov, N. A. Tkachenko, V. A. Tkachenko // Dop. NAN Ukraine. – 2006. – № 4. – S. 97 – 102.
3. Bolshakov Wade. I. Chastkova kompensatsiya nepovnoti formalnoy aksiomatiki pri identifikatsiy stryctyru metaly / Wade. I. Bolshakov, V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // Visnik NAN Ukrainu. – 2014. – № 9. – S. 46 – 49.
4. Tushinskiy L. I. Methodu issledovania materialov / L. I. Tushinskiy, A. V. Ploxov, A. O. Tokarev, V. I. Sindeev. – M. : Mir, 1965. – 384 s.
5. Bolshakov V. I. Osobenosti multifractalnogo formalisma v materialovedenii / V. I. Bolshakov, V. N. Volchuk, Yu. I. Dubrov // Dop/ NAN of Ukraine. – 2008. – № 11. – S. 99 – 107.

УДК 666.97+004

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНОВ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

*Н. Д. Сизова, д. ф-м. н., проф., И. А. Михеев, к. т. н.*

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков*

**Ключевые слова:** технология бетона, моделирование, информационные технологии

**Постановка проблемы.** Технология производства бетонных изделий, в том числе, для конструкций и сооружений железных дорог, предполагает выполнения нескольких основных этапов, одним из которых является задача проектирования состава бетона [1; 15]. Наличие большого количества научной литературы [1; 5; 7; 15; 16; 20] подчеркивает актуальность данной проблемы и в то же время указывает на многие нерешенные вопросы относительно

методологии проектирования состава бетона, в том числе использование химических и минеральных добавок, которые позволяют значительно повысить эффективность составов, достичь необходимых изменений определенных свойств и т. п.

Бетон является одним из основных конструкционных материалов, который широко применяется при проектировании железнодорожных конструкций и сооружений, эксплуатируемых в сложных условиях, таких как:

- среда с агрессивной степенью влияния;
- условия повышенной влажности;
- изменяемые температурные характеристики;
- периодическое замораживание – оттаивание в осенне-зимне-весенний период;
- неравномерные нагрузки.

С учетом этого для обеспечения безопасности, надежности, долговечности работы железнодорожных конструкций и сооружений необходимо проектировать бетоны, которые обладают высокой прочностью, водонепроницаемостью, морозостойкостью, трещиностойкостью, сопротивлением электрокоррозии бетона [11; 18].

**Анализ публикаций.** Бетон как многокомпонентный материал является сложной системой, характеризующейся значительным числом взаимосвязанных параметров. Как правило, методология решения задачи проектирования состава бетона основывается на известных закономерностях [1; 15].

В УкрГАЗТ [11] разработана методика проектирования состава бетонов, к которым предъявляются особые требования и которые используются в железнодорожных конструкциях и сооружениях.

В соответствии с методикой УкрГАЗТ для получения высоких показателей физико-механических и физических свойств бетона необходимо выполнение условия, при котором между структурообразующими элементами каждого структурного уровня материала образуются прослойки матрицы. Структура этой прослойки определяет свойства бетона, в том числе фильтрационные и деформативные. Наилучшие показатели свойств отмечаются при наиболее плотной упаковке частиц матрицы в прослойке, которой соответствуют оптимальные значения коэффициентов раздвижки  $\alpha_{онт}$  и  $\mu_{лтг}$ , а зависимости свойств от  $\alpha$  и  $\mu$  являются экстремальными с максимумами, соответствующими  $\alpha_{онм}$  и  $\mu_{онм}$  (1):

$$\alpha_{онм} = 2,1 \cdot \left(1 + \frac{d_n}{d_{ц}}\right)^3 - 1,1; \quad \mu_{онм} = 2,1 \cdot \left(1 + \frac{d_{ц}}{d_n}\right)^3 - 1,1, \quad (1)$$

где  $d_{ц}$ ,  $d_n$ ,  $d_{ц}$  – средний размер определяющей фракции зерен крупного и мелкого заполнителя и частиц цемента, соответственно, мм.

Авторы методики УкрГАЗТ разработали алгоритм обеспечения долговечности бетонных сооружений, построенный на кинетических зависимостях изменения эксплуатационных особенностей бетона от его состава – ползучести, деформирования конструкции, развития трещин, прочности бетона при замораживании и оттаивании, а также коррозии и др.

Методология определения состава бетона [18] дополнена возможностью учета действия добавок: суперпластификатора и ускорителя твердения, и положена в основу алгоритма. Оптимальные дозировки добавок позволяет обеспечивать в определенные сроки твердения оптимальные соотношения между кристаллогидратными и гелевыми продуктами гидратации, минимальную капиллярную пористость, т. е. улучшить показатели прочности, водонепроницаемости, деформативности и трещиностойкости.

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы является усовершенствование моделей, методов, алгоритмов проектирования составов бетонов для конструкций и сооружений железных дорог.

Моделирование бетона представляет непростую задачу, несмотря на то, что состав этого материала проектируется и подбирается. Трудности заключаются в сложности используемой модели и соответственно ее приближении к моделируемой конструкции, поэтому применяется деформационная модель расчета бетона [13].

Большое количество входных параметров в задаче проектирования состава бетона (характеристики составных материалов, характеристики бетонной смеси и бетона в проектном возрасте, характеристики и условия эксплуатации конструкции), сложность методов расчета и важность оперативного получения результата обусловили необходимость применения

современных информационных технологий для автоматизации решения поставленных задач [9; 12].

Целесообразность и актуальность использования информационных технологий для решения задачи проектирования состава бетона подтверждаются существованием программного обеспечения для решения подобных вопросов (как отечественных, так и зарубежных разработчиков), его активным развитием и усовершенствованием, а также позитивным опытом авторов в разработке подобных проектов.

**Основной материал.** В основе деформационной модели расчета бетона лежат вопросы, связанные с моделированием полной диаграммы деформирования бетона, которая дает возможность оценить напряженно-деформированное состояние и прочность бетона. Такая модель дает возможность не рассматривать лишние эмпирические зависимости, более точно оценивать работу бетонных конструкций, проектировать их более надежными и экономичными [13].

Модель представляет собой уравнения механического состояния в виде аналитической зависимости, которая аппроксимирует диаграмму деформирования стержневых бетонных элементов. Эта модель рассматривается как параметрическая кривая, точки которой представляют результат экспериментальных зависимостей. Основой этой модели является экспериментальная зависимость в виде диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » (напряжения – деформации). В экспериментальных исследованиях диаграмма деформирования разная для одинаковых бетонов при разных режимах нагрузки, которые превышают границу ее длительной прочности.

Считается что отклонения диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » поведения бетона от диаграммы линейно-упругого материала происходит за счет неупругих деформаций, обусловленных микротрещинообразованием.

Упруго-вязкое состояние бетона может сохраняться лишь при линейных или слегка нелинейных закономерностях напряжений от деформаций. На более высоких ступенях напряжений надо учитывать процесс внутреннего разрушения. Следовательно, большая часть неупругих деформаций бетона может быть отнесена за счет разрушения микроструктуры.

Таким образом, речь идет о нелинейной деформационной модели расчета.

Для определения напряженно-деформированного состояния бетона исследовалась следующая система уравнений [13].

Уравнения равновесия:

$$\sigma_{ij}(x) + \rho(x)F_i = 0, x \in V, , \quad (2)$$

где  $x$  – радиус-вектор пространственного положения частицы;

$\rho(x)$  – плотность материала;

$\rho F_i$  – компоненты внешних сил.

Здесь и далее по умолчанию запятая с индексом означает частную производную по соответствующей координате  $x_i$ , индексы при компонентах тензоров, набранные малыми латинскими буквами, принимают значения от 1 до 3.

Геометрические соотношения (соотношения Коши):

$$\varepsilon_{ij}(x) = \frac{1}{2}(u_{i,j}(x) + u_{j,i}(x)), x \in V, , \quad (3)$$

где  $u_i$  – компоненты вектора перемещения.

Физические (определяющие) соотношения:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}(x)\varepsilon_{kl}, x \in V, , \quad (4)$$

где  $C_{ijkl}$  – компоненты тензора упругих констант.

Граничные условия для перемещений и нагрузок

$$\begin{aligned} u(x) &= f(x), \\ \sigma_{ij}(x) &= n_j(x) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Необходимо также учитывать нелинейное поведение, которое характеризует состояние поведения конструкции (появление трещин). Жесткость в таких случаях меняется скачком и может зависеть от нагрузки или других причин. Появление трещин в плоскости, перпендикулярной одной из координатных осей, приводит к падению жесткости материала в данном направлении. Под жесткостью понимается образование в бесконечно малом элементе среды зоны со сниженными механическими характеристиками в результате накопления повреждений.

Моделирование диаграммы деформирования бетона и, как следствие, определения прочностных характеристик бетона выполняется как с привлечением экспериментальных исследований, так и с привлечением существующих методик прогнозирования прочности бетона [14; 19].

При исследовании модели бетона численными методами применяется, как правило, метод конечных элементов МКЭ [8].

Основная идея МКЭ состоит в том, что любую непрерывную величину (перемещение, давление и др.) можно аппроксимировать моделью, состоящей из отдельных элементов. На каждом из этих элементов исследуемая непрерывная величина аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, которая строится на значениях исследуемой непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемого элемента. В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна и нужно определить значение этой величины во внутренних точках области, т. е. создать дискретную модель. Дискретная модель может быть легко построена, если сначала предположить, что известны числовые значения этой величины в некоторых внутренних точках области, называемых узлами.

На базе МКЭ разработаны современные программные комплексы, с помощью которых изучаются деформационные модели, в том числе и для бетонов [3].

Поведение модели бетона при исследовании численными методами с использованием программных комплексов ЛИРА, SCAD, ANSYS и др. [3; 6], которые основаны на МКЭ, изучается в предположении ограниченности количества составляющих бетонной смеси. Изучение и анализ результатов моделирования бетонов [3; 6] показал, что с высокой степенью надежности поведение бетона можно описать, используя два фактора: прочностные характеристики и структурные характеристики. При этом могут быть рассмотрены механизмы трещинообразования и разрушения конструкций и сооружений. Для этого, например, в пакете ANSYS используются конечные элементы для бетона SOLID65 [2], учитываются критерий разрушения бетона при сложном напряженном состоянии, нелинейные свойства бетона, определяются зоны, характер и направление образовавшихся трещин.

Для учета трещин в конечноэлементной модели конструкции используются [4] два метода в зависимости от расчетной схемы:

- аппроксимация бетона с трещинами эквивалентным по жесткости сплошным анизотропным телом;
- моделирование бетона с трещинами путем расшивки сетки конечных элементов по траектории трещин с заменой арматуры упругими связями между узлами.

При моделировании по мере роста трещины изучается изменение внешних продольных и поперечных деформаций, которые и замеряются при натурных испытаниях. Рост одной трещины моделируется изменением внешних связей, а нескольких – путем изменения модуля упругости конечных элементов. По результатам моделирования могут быть построены графики изменения продольных деформаций и коэффициента Пуассона в зависимости от относительной длины трещины.

В задаче проектирования состава бетона важным аспектом является обеспечение заданного уровня прочности в указанные сроки твердения. На скорость твердения бетона влияют минералогический состав, вид и активность цемента, начальное количество воды в бетонной смеси, которое определяет ее подвижность (или жесткость). Жесткие бетонные смеси с низким содержанием воды обеспечивают более быстрое твердение бетона, чем подвижные.

Авторы [17] для решения задачи проектирования состава бетона предложили и экспериментально верифицировали новую зависимость для оценки нарастания прочности бетона во времени с учетом использования цементов различных видов и добавок ускорителей твердения.

Статистический анализ экспериментальных данных показал (для некоторых видов цемента) высокую сходимость реальных и моделируемых результатов: коэффициент корреляции – 0,97, стандартная ошибка – 0,27 (суток), что свидетельствует о возможности использования предложенной зависимости для прогнозирования прочности бетона в определенный момент времени твердения.

Для определения (уточнения) коэффициента ускорения/замедления твердения  $k$  необходимо проведение экспериментальных исследований с участием различных видов цементов и ускоряющих добавок, что существенно усложняет процесс принятия решения, однако дает возможность с высокой точностью получать количественную оценку нарастания

прочности бетона в любой момент времени. Исследованы прочностные характеристики проектируемого бетона, построены графики зависимости прочности бетона от времени твердения (рис. 1). Прочностные характеристики получены с использованием компьютерной программы «ПСБ УкрДАЗТ» [10].

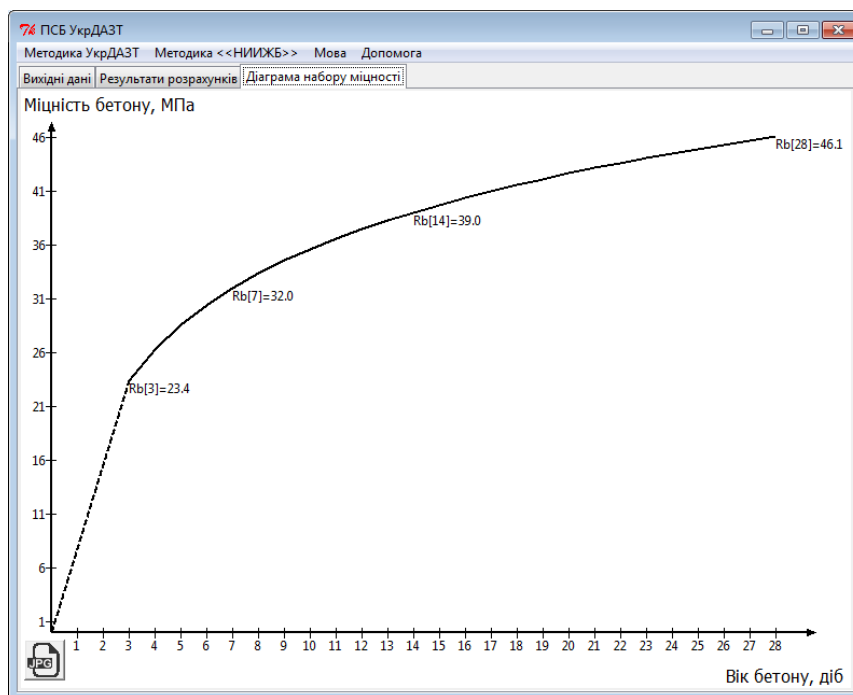


Рис. 1. Диаграмма набора прочности бетона для проектируемого состава

**Выводы.** Математическое и компьютерное моделирование позволяет рассматривать вопросы проектирования составов бетона с заданными свойствами, проводить вычислительный эксперимент и анализ результатов, выработать рекомендации относительно применения и использования бетонов для железнодорожных конструкций и сооружений.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. **Баженов Ю. М.** Способы определения состава бетона различных видов. – М. : Стройиздат, 1975. – 272 с.
2. **Барголомей М. Л.** О применении пакета ANSYS для исследования деформирования с учетом трещинообразования / М. Л. Барголомей, Н. А. Труфанов // Вестник ПГТУ. Механика. 2009. – № 1. – С. 15 – 21.
3. **Басов К. А.** ANSYS в примерах и задачах. – М. : Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
4. **Варламов А. А.** Выбор факторов моделирования работы бетона / А. А. Варламов, Ю. М. Круциляк // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения. – СПб: Нестор, 2001. – С. 62 – 66.
5. **Вознесенский В. А.** Современные методы оптимизации композиционных материалов / В. А. Вознесенский, В. Н. Выровой, В. Я. Керш и др. – К. : Будівельник, 1983. – 144 с.
6. **Городецкий А. С.** Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций / А. С. Городецкий, А. В. Шмуклер, А. В. Бондарев. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с.
7. **Дворкин Л. И.** Основы бетоноведения / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – СПб : Стройбетон, 2006. – 692 с.
8. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. – М. : Мир, 1975. – 349 с.
9. **Латорец Е. В.** Анализ применения современных информационных технологий для решения задач производства товарного бетона / Е. В. Латорец, И. А. Михеев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков : ЕЕJET, 2011. – № 3/9 (45). – С. 4 – 6.

10. **Міхєєв І. А.**, Плуґін А. А., Сізова Н. Д., Калінін О. А., Плуґін Ант. А. Комп'ютерна програма «ПСБ УкрДАЗТ». А. с. 56825 Україна. – Опубл. 09.10.2014.
11. **Плуґин А. А.** Физико-химическая модель долговечности бетона и железобетона / А. А. Плуґин // Проблемы надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті : Зб. наук. пр. – Харків : УкрДАЗТ, 2006. – Вип. 77. – С.104 – 119.
12. **Плуґин А. А.** Программное обеспечение системы проектирования состава бетона для конструкций и сооружений железных дорог / А. А. Плуґин, О. А. Калинин, Н. Д. Сизова, И. А. Михеев // Технологический аудит, 2013. – № 6/1(14). – С. 38 – 40.
13. **Поручиков В. Б.** Методы динамической теории упругости. – М. : Наука, 2001. – 328 с.
14. **Роговой С. І.** Проблема дослідження і реалізації діаграм стану бетону в теорії розрахунку залізобетонних конструкцій // Будівельні конструкції. – К. : Будівельник, 2003. – Вип. 59. – С. 137 – 142.
15. **Скрамтаєв Б. Г.** Способы определения состава бетона различных видов / Б. Г. Скрамтаєв, П. Ф. Шубенкин, Ю. М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1966. – 159 с.
16. **Сизов В. П.** Рациональный подбор составов тяжелого бетона. – М. : Стройиздат, 1995. – 174 с.
17. **Сизова Н. Д.** Оценка изменения прочности бетона во времени / Н. Д. Сизова, И. А. Михеев // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА ХОТВ АБУ, 2013. – № 74. – С. 190 – 195.
18. Спосіб визначення складу високоміцного, тріщиностійкого і водонепроникного бетону. Патент України 62613 UA, МПК 7C04B28/12 / А. М. Плуґін, О. А. Калінін, С. В. Мірошніченко, А. А. Плуґін та ін. – Заявл. 15.04.2003. – № 2003043396. – Опубл. 15.06.2005. – Бюл. № 6.
19. Спосіб одержання повних діаграм стану: Патент України 55204 А, МКІ E04C1/04/ С.І. Роговой, Д. В. Круглий, Р. І. Пахомов. – Заявл. 19.07.2002. № 2002076000. – Опубл. 17.03.2003. – Бюл. № 3.
20. **Файнер М. Ш.** Новые закономерности в бетоневедении и их практическое приложение. – К. : Наукова думка, 2001. – 448 с.

## SUMMARY

Concrete production is a complex process, which consists of several important tasks. Design of concrete – the first and most demanding task in this list. Successful solving of this task determines the efficiency, reliability and safety of constructions.

The paper is devoted to the use of mathematical and computer modeling for solving the problem of concrete designing for constructions of railways.

A great amount of literature, which focuses on questions of concrete mix designing, is an indicator of the importance and relevance of the chosen direction.

Methodology of concrete mix design, which has been developed in the Ukrainian Academy of Railways, provides a high mechanical and physical properties of concrete and selected as the basis.

The methodology supplemented possibility of account of influence of plasticizers and additives hardening accelerators.

Expediency and relevance of the use of information technology to solve the problem of designing the concrete composition confirmed by the existence of software for solving such problems (of both domestic and foreign developers), its active development and improvement, and positive experience of the authors in the development of such projects.

The goal of research – the improvement of models, methods and algorithms designing of concrete for construction of railways.

The model represents the mechanical state of the equation in the form of analytical dependence, which approximates the stress-strain diagram of core concrete elements. This model is considered as a parametric curve, the points of which are the result of the experimental curves. The basis of this model is the experimental dependence in the form of diagrams « $\sigma$ - $\varepsilon$ » (stress – strain). In experimental studies, different stress-strain diagram for the same concrete under different load conditions that exceed the limits of its long-term strength.

Modeling of the deformation diagram of concrete and as a result, the definition of the strength characteristics of concrete made with the involvement of both experimental studies and with the involvement of existing methods of forecasting the strength of concrete

The authors have proposed and experimentally verified a new dependency for the evaluation of concrete strength in time with the use of various types of cements and additives hardening accelerators. The basis of dependence – acceleration factor, which is determined experimentally.

Developed dependency introduced into the algorithm of software «PSB UkrSAR», which allows the design of concrete with the achievement of the desired strength in the specified period of hardening, as well as present the results of the application of dependence in the as a diagram strength development concrete.

Mathematical and computer modeling allows us to solve the problem of designing concrete compositions with desired properties, to carry out numerical simulation and analysis of the results, make recommendations regarding the application and use of concrete for railway designs and constructions

## REFERENCES

1. Bazhenov Y. M. *Sposoby opredeleniya sostava betona razlichnykh vidov.* – M. : Stroizdat, 1975. – 272 s.
2. Bartolomey M. L. O primeneniі paketa ANSYS dlya issledovaniya deformirovaniya s uchetoм treshchinoobrazovaniya / M. L. Bartolomey, N. A. Trufanov // *Vestnik PGTU. Mekhanika.* 2009. – № 1. – С. 15 – 21.
3. Basov K. A. *ANSYS v primerakh i zadachakh.* – M. : Komp'yuter Press, 2002. – 224 s.
4. Varlamov A. A. *Vybor faktorov modelirovaniya raboty betona* / A. A. Varlamov, Y. M. Krutsilyak // *Nauchno-tekhnicheskiye problemy prognozirovaniya nadezhnosti i dolgovechnosti konstruksiy i metody ikh resheniya.* – SPb : Nestor. – 2001. – S. 62 – 66.
5. Voznesenskiy V. A. *Sovremennyye metody optimizatsii kompozitsionnykh materialov* / V. A. Voznesenskiy, V. N. Virovoy, V. Ya. Kersh i dr. – K. : Budivel'nik, 1983. – 144 s.
6. Gorodetskiy A. S. *Informatsionnyye tekhnologii rascheta i proyektirovaniya stroitel'nykh konstruksiy* / A. S. Gorodetskiy, A. V. Shmuckler, A. V. Bondarev. – Kharkov : NTU «KhPI», 2003. – 889 s.
7. Dvorkin L. I. *Osnovy betonovedeniya* / L. I. Dvorkin, O. L. Dvorkin. – Spb: Stroi-beton, 2006. – 692 s.
8. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike.* – M. : Mir, 1975. – 349 s.
9. Latoretz E. V. *Analiz primeneniya sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy dlya resheniya zadach proizvodstva tovarnogo betona* / E. V. Latoretz, I. A. Mikheev // *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy.* – Kharkov : EEJET, 2011. – № 3/9 (45). – S. 4 – 6.
10. Mikheev I. A., Plugin A. A., Sizova N. D., Kalinin O. A., Plugin Ant. A. *Komp'yuterna prohrama « PSB UkrDAZT ».* A.c. 56825 Ukraine. – Publ. 09.10.2014.
11. Plugin A. A. *Fiziko-khimicheskaya model' dolgovechnosti betona i zhelezobetona* / A. A. Plugin // *Problemy nadiynosti ta dovhovichnosti inzhenernykh sporud ta budivel' na zaliznichnomu transporti: Zb. nauk. pr.* – Kharkiv: UkrSAR, 2006. – Vyp. 77. – S.104 – 119.
12. Plugin A. A. *Programmnoye obespecheniye sistemy proyektirovaniya sostava betona dlya konstruksiy i sooruzheniy zheleznykh dorog* / A. A. Plugin, O. A. Kalinin, N. D. Sizova, I. A. Micheev // *Tekhnologicheskij audit,* 2013. – № 6/1 (14). – S. 38 – 40.
13. Poruchikov V. B. *Metody dinamicheskoy teorii uprugosti.* – M. : Nauka, 2001. – 328 s.
14. Rogovoy S. I. *Problema doslidzhennia i realizatsyi diahram stanu betonu v teorii rozrakhunku zalizobetonnykh konstruksiy* // *Budivelni konstruksiyi.* – K. : Budivel'nik, 2003. – Vyp. 59. – S. 137 – 142.
15. Skaramtaev B. G. *Sposoby opredeleniya sostava betona razlychnykh vidov* / B. G. Skaramtaev, P. F. Shubenkin, Y. M. Bazhenov. – M. : Stroizdat, 1966. – 159 s.
16. Sizov V. P. *Ratsional'nyy podbor sostavov tyazhe logo betona.* – M. : Stroizdat, 1995. – 174 s.
17. Sizova N. D. *Otsenka izmeneniya prochnosti betona vo vremeni* / N. D. Sizova, I. A. Mikheev // *Naukovyy visnyk budivnytstva.* – Kharkov: KHNUBA KHOTB ABU, 2013. – № 74. – S. 190 – 195.
18. *Sposib vyznachennya skladu vysokomitsnoho, trishchynostiykoho i vodonepronyknoho betonu: Patent Ukrayiny 62613 UA / MPK 7C04B28/12/ A. M. Plugin, O. A. Kalinin, S. V. Miroshnichenko, A. A. Plugin ta in.* – Zayavl.15.04.2003. – № 2003043396. – Opubl. 15.06.2005. – Bul. № 6.

19. Sposib oderzhannya povnykh diahram stanu: Patent Ukrayiny 55204 A, MKI E04C1/04/ S. I. Rogovoy, D. V. Krugliy, R. I. Pahomov. – Zayavl. 19.07.2002. – № 2002076000. – Opubl. 17.03.2003. – Bul. № 3.

20. Fainer M. Sh. Novyye zakonomernosti v betonovedeniy i ikh prakticheskoye prilozheniye. – K. : Naukova dumka, 2001. – 448 s.

---