

УДК 691.32

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-86-93

*Д.Р. МАИЛЯН, Г.В. НЕСВЕТАЕВ,
Донской государственный технический университет*

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЖЕСТКОСТИ И ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ВАРЬИРОВАНИЕМ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ БЕТОНА

Реальные значения модуля упругости, применяемые для изготовления железобетонных изделий и конструкций бетонов, могут существенно отличаться от приведенных в СП 63.13330, в связи с чем представляет интерес оценка «рационального» значения модуля упругости бетона для конкретной конструкции.

Целью работы является создание алгоритма расчета балок по нормальным напряжениям и деформациям на основе варьирования модуля упругости бетона управлением рецептурно-технологическими факторами.

В качестве материалов были использованы бетон тяжелый классов до В120 с органическими и минеральными модификаторами, балки железобетонные. Были применены такие методы, как моделирование, численный эксперимент, расчет балок по нормальным напряжениям и деформациям.

Предложен алгоритм расчета балок по нормальным напряжениям и деформациям, позволяющий учитывать возможное изменение модуля упругости бетона одного класса до 2 раз.

Назначение модуля упругости бетона для обеспечения жесткости балки с учетом армирования и параметров сечения обеспечивает прочность по нормальным напряжениям при нормировании прочности бетона с учетом влияния рецептурно-технологических факторов.

Ключевые слова: железобетонные конструкции; модуль упругости; деформационные свойства; балки; добавки.

Для цитирования: Маилян Д.Р., Несветаев Г.В. Регулирование жесткости и прочности железобетонных балок варьированием модуля упругости бетона // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 86–93.

*D.R. MAILYAN, G.V. NESVETAEV,
Don State Technical University*

RIGIDITY AND STRENGTH ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS BY VARYING ELASTICITY MODULUS

Relevance: The actual values of the elastic modulus used for manufacturing reinforced concrete products and concrete structures may differ significantly from those given in SNiP 63.13330. It is therefore interesting to estimate the rational value of the elasticity modulus of concrete for a particular design. **Purpose:** Calculation algorithm is proposed for normal stresses and deformations based on variation of the elasticity modulus of concrete by controlling prescribed and technological factors. **Materials and methods:** Ordinary concrete grades up to В120 grade with organic and mineral modifiers, reinforced concrete beams, modeling, numerical experiment, beam analysis by normal stresses and deformations. **Results:** The proposed beam analysis algorithm considers a possible change up to 2 times in the elasticity modulus of concrete. **Conclusions:** Calculations of the elasticity modulus ensure the beam rigidity, taking into account its reinforcement and cross-sectional parameters and strength for normal stresses

at a concrete strength normalization corresponding to the elastic modulus, with regard to prescribed and technological factors.

Keywords: reinforced concrete structure; modulus of elasticity; deformation properties; beam; admixture; additive.

For citation: Mailyan D.R., Nesvetaev G.V. Regulirovanie zhestkosti i prochnosti zhelezobetonnykh balok var'irovaniem modulya uprugosti betona [Rigidity and strength analysis of reinforced concrete beams by varying elasticity modulus]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 86–93. (rus)

Введение

Расчет железобетонных конструкций, особенно с использованием полных диаграмм деформирования бетона [1–4], позволяет получить реальную картину напряженно-деформированного состояния сечений. При этом необходимы достоверные данные о деформационных свойствах бетона.

При расчете по второй группе предельных состояний предполагается использование в качестве одного из основных нормируемых показателей качества бетона начального модуля упругости E_b (далее – модуль упругости E), значения которого принимаются согласно СП 63.13330 в зависимости от класса бетона по прочности на сжатие и вида бетона.

Вместе с тем, по данным [5–7], модуль упругости тяжелого бетона в зависимости от модуля упругости используемого крупного заполнителя может изменяться в пределах от 0,8 до 1,36 относительно модуля упругости бетона на гранитном щебне с модулем упругости 70 ГПа. Согласно EN 1991-1-1 значение модуля упругости бетона принимается с коэффициентом от 0,7 до 1,2 при использовании в качестве крупного заполнителя песчаника и базальта соответственно. Согласно СП 40.13330 значение начального модуля упругости бетона устанавливается в зависимости от класса бетона и марки бетонной смеси по удобоукладываемости и принимается с коэффициентом 0,65–0,78 для бетона одного класса для подвижных бетонных смесей относительно жестких. Согласно СНБ 5.03.01 модуль упругости бетона принимается в зависимости от класса по прочности на сжатие и марки бетонной смеси по удобоукладываемости и может изменяться для бетона одного класса в пределах от 0,65 до 0,7 для литых бетонных смесей относительно жестких. По данным [8], модуль упругости бетонов, содержащих суперпластифицирующие и (или) минеральные добавки, может изменяться в пределах от 0,8 до 1,1.

На рис. 1 представлена обобщающая зависимость модуля упругости бетона по различным нормам и предложениям без учета влияния суперпластифицирующих и (или) минеральных добавок на модуль упругости. Как следует из представленных на рис. 1 данных, значение модуля упругости бетона в пределах одного класса может изменяться в пределах от 0,78 до 1,48, т. е. в 1,9 раза относительно нормируемых в СП 63.13330 значений.

Учет влияния добавок на модуль упругости бетона в работе [8] предложено осуществлять посредством коэффициента

$$k_{SP} = k_{E, ЦК}^{0,5}, \quad (1)$$

где k_{SP} – коэффициент, учитывающий влияние добавок на модуль упругости бетона; $k_{E, ЦК}$ – коэффициент, учитывающий влияние добавок на модуль упругости цементного камня.

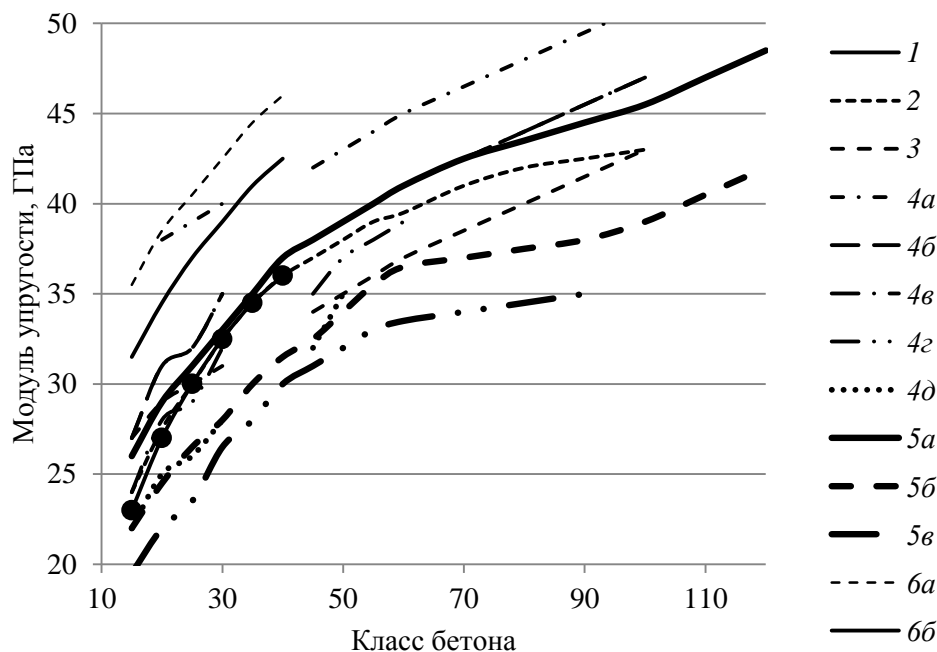


Рис. 1. Зависимость модуля упругости бетона от класса бетона:
 1 – СНиП 2.03.01 (отменен); 2 – СП 63.13330; 3 – EN 1992-1-1; 4а, б, в, г, д – по СНБ 5.03.01-02 соответственно для бетонов, полученных из бетонных смесей с маркой по удобоукладываемости Ж3-Ж4, Ж1-Ж2, П1-П2, П3-П5, Л1-Л5; 5а, б, в – по [8] соответственно для бетонов, полученных из бетонных смесей с маркой по удобоукладываемости Ж2-П1, П2-П4, П5-СУБ

По данным [8], в зависимости от вида цемента и суперпластифицирующей добавки значение коэффициента $k_{E, ЦК}$ в формуле (3) может изменяться в пределах от 0,76 до 1,1, при этом значение коэффициента, учитывающего влияние добавок на модуль упругости бетона, составляет от 0,87 до 1,05.

Таким образом, реальные значения модуля упругости, применяемые при изготовлении железобетонных изделий и конструкций бетонов, могут существенно отличаться от приведенных в СП 63.13330. В связи с вышеизложенным представляет интерес оценка «рационального» значения модуля упругости бетона для конкретной конструкции. Ниже предлагается подход к выбору «рационального» значения модуля упругости бетона на примере изгибаемых элементов с одиночной арматурой.

Методы

Обычно расчет железобетонных конструкций выполняется сначала по первой группе предельных состояний. В результате по заданным размерам

сечения и классам бетона и арматуры определяются параметры армирования. Далее при расчете по второй группе предельных состояний, в частности, осуществляется проверка по трещиностойкости и допускаемым деформациям и при необходимости осуществляется корректировка армирования.

Предлагаемый ниже подход на примере изгибаемого элемента с одиночным армированием, основанный на известных уравнениях теории железобетона, показывает возможность оценить диапазон допустимого изменения начального модуля упругости бетона конкретного класса, в пределах которого будут обеспечены требования по жесткости конструкции.

Как известно, изгибаемые железобетонные элементы с одиночной арматурой проектируются, как правило, по первому случаю. При этом момент внутренней пары сил можно определить как

$$M_p = R_s A_s \left(h_0 - \frac{\xi h_0}{2} \right) \quad (2)$$

или, учитывая, что для таких конструкций рекомендуемые значения $\xi = 0,2$:

$$M_p = 0,9 R_b A_s h_0 = 0,9 R_s \cdot h_0^2 \cdot b \cdot \mu. \quad (3)$$

Момент внутренних сил может быть представлен также следующей формулой:

$$M_p = R_b b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) = R_b b \xi h_0 \left(h_0 - \frac{\xi}{2} h_0 \right) = R_b b h_0^2 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2} \right). \quad (4)$$

При нормативной нагрузке момент внутренней пары сил определяется как

$$M_q = R_{bn} b h_0^2 \xi_n \left(1 - \frac{\xi_n}{2} \right), \quad (5)$$

а при расчетной нагрузке с учетом $R_b = 1,3 R_{bn}$:

$$M_p = 1,3 \cdot R_{bn} b h_0^2 \xi_p \left(1 - \frac{\xi_p}{2} \right). \quad (6)$$

Из формул (2), (4) и (5) следует:

$$1,3 \cdot R_{bn} b h_0^2 \xi_p \left(1 - \frac{\xi_p}{2} \right) = 0,9 \mu b h_0^2 R_s, \quad (7)$$

откуда
$$R_{bn} = \frac{0,9 \mu R_s}{1,3 \cdot \xi_p \left(1 - \frac{\xi_p}{2} \right)} \quad (8)$$

или
$$R_{bn} = \frac{0,9 \mu R_s}{\xi_n \left(1 - \frac{\xi_n}{2} \right)}. \quad (9)$$

Прогиб для однопролетной шарнирно опертой балки при кратковременном действии равномерно распределенной нагрузки определяется как

$$f = k_1 \frac{M \cdot L^2}{0,85 \cdot E \cdot I} \quad (10)$$

или, с учетом $f = c \cdot L$:

$$c \cdot L = k_1 \frac{M \cdot L^2}{0,85 \cdot E \cdot I}, \quad (11)$$

откуда следует:

$$c = k_1 \frac{12 \cdot R_{bn} \cdot b \cdot h_0^2 \left(x_n - \frac{x_n^2}{2} \right) L}{0,85 \cdot E \cdot b \cdot h_0^3} = k_1 \frac{12 \cdot R_{bn} \left(x_n - \frac{x_n^2}{2} \right) L}{0,85 \cdot E} = k_1 \frac{12 \cdot R_{bn} \left(x_n - \frac{x_n^2}{2} \right) L}{0,85 \cdot E} \frac{L}{h_0}. \quad (12)$$

Из формул (4), (9) и (11) получим зависимость для начального модуля упругости бетона от пролета и параметров сечения в виде

$$E = \frac{0,9 \cdot \mu \cdot R_s \cdot 12 \cdot k_1 \cdot L}{0,85 \cdot c \cdot h_0} = \frac{10,8 \cdot \mu \cdot k_1 \cdot R_s \cdot L}{0,85 \cdot c \cdot h_0} \quad (13)$$

Поскольку, согласно [8], начальный модуль упругости бетона связан с пределом прочности, например, зависимостью

$$E = 1000 \cdot k_s \cdot k_a \cdot k_i \frac{0,05 \cdot R_{bn} + 57}{1 + \frac{29}{3,8 + R_{bn}}}, \quad (14)$$

где k_s , k_a , k_i – коэффициенты, учитывающие влияние модуля упругости крупного заполнителя, суперпластифицирующей и минеральной добавок на модуль упругости бетона, то между нормативным сопротивлением бетона и начальным модулем упругости получим соотношение в виде

$$R_{bn} = 0,8 \cdot 10^{-10} \frac{E^{2,569}}{0,87 \cdot k^{3,2}}, \quad (15)$$

в котором

$$k = k_s \cdot k_a \cdot k_i. \quad (16)$$

Результаты

Представленные на рис. 2 зависимости между R_{bn} и модулем упругости бетона показывают, что при одном и том же классе бетона по прочности на сжатие начальный модуль упругости бетона при изменении рецептурно-технологических факторов может изменяться более чем в 1,5 раза, что в принципе не противоречит известным данным [5–15]. Самым простым примером является сравнение тяжелых, мелкозернистых и легких бетонов на пористых заполнителях (таблица).

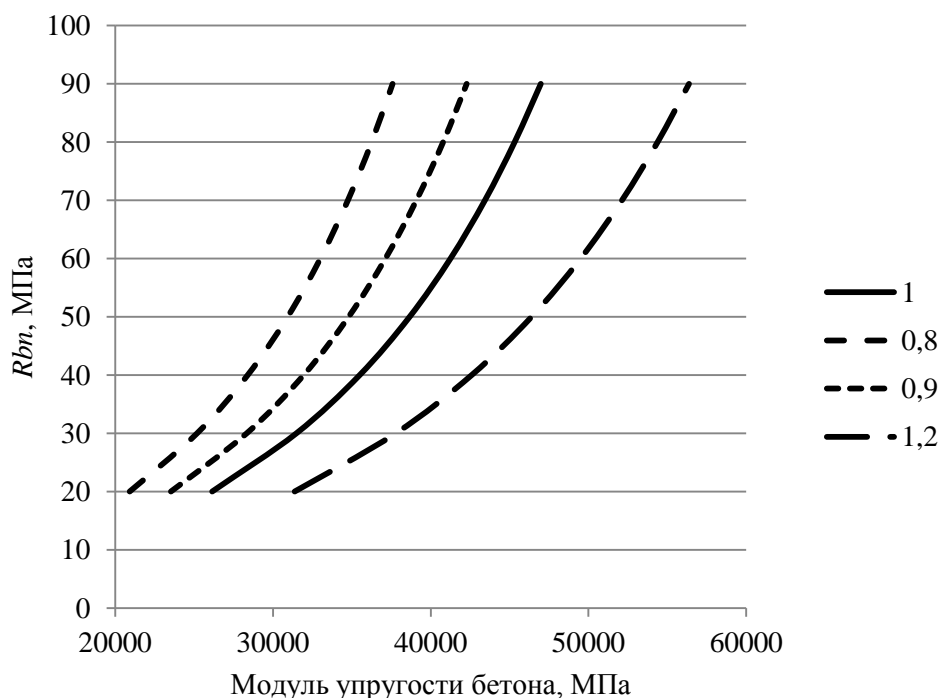


Рис. 2. Соотношение E и R_{bn} по формуле (15) при значениях k в формуле (16) 0,8–1,2

Сравнение начальных модулей упругости бетонов

Класс бетона	Начальный модуль упругости по СП 63.13330, ГПа, для бетонов		
	ТБ	МЗБ	ЛБ
B25	25	24 (1,05) ¹	18,5 (1,35) ²
B30	30	26 (1,15)	19,5 (1,54)
B35	35	27,5 (1,27)	20,5 (1,71)
B40	40	28,5 (1,40)	21 (1,90)

Примечание. ТБ – тяжелый бетон; МЗБ – мелкозернистый бетон; ЛБ – марка по плотности D1800; 1 – в скобках $E_{ТБ}/E_{МЗБ}$; 2 – $E_{ТБ}/E_{ЛБ}$.

Таким образом, возможен следующий алгоритм расчета изгибаемых сечений с одиночной арматурой с целью обеспечения требований по первой (по нормальным напряжениям) и второй группам предельных состояний (по деформациям) в едином цикле:

- по формуле (1) определяется коэффициент армирования сечения;
- по формуле (11) определяется требуемый модуль упругости бетона;
- по формуле (13) определяется требуемое значение R_{bn} с учетом возможных рецептурно-технологических особенностей бетонной смеси (марка по удобоукладываемости, наличие суперпластифицирующих и (или) минеральных добавок и др.), по которому определяется требуемый класс бетона по прочности на сжатие.

При необходимости расчеты можно вести в режиме пошагового приближения.

Заключение

Прочность и жесткость железобетонных балок в значительной мере зависят от классов используемых материалов. В нормах проектирования для каждого класса бетона приводятся соответствующие параметры модулей упругости. Вместе с тем проведенные исследования показывают, что реальные модули упругости бетонов значительно отличаются от нормативных. Большое влияние на модуль упругости бетона оказывают свойства крупного заполнителя и применяемых добавок.

Приведенные выше формулы позволяют назначать начальный модуль упругости бетона в зависимости от пролета и параметров сечения балки. При этом учитывается влияние на модуль упругости бетона как крупного заполнителя, так и органоминеральных модификаторов.

Варьируя модулем упругости бетона даже при неизменном классе бетона по прочности на сжатие, можно управлять прочностными и деформационными свойствами железобетонных балок в широком диапазоне посредством назначения требуемого модуля упругости бетона с учетом армирования и параметров сечения балки с учетом влияния рецептурно-технологических факторов на деформационные свойства бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мкртчян А.М., Маилян Д.Р. Расчет железобетонных колонн из высокопрочного бетона по недеформированной схеме // Научное обозрение. 2013. № 11. С. 72–76.
2. Аксенов В.Н., Маилян Д.Р., Аксенов Н.Б. Железобетонные колонны из высокопрочного бетона. Ростов н/Д: РГСУ, 2012. 167 с.
3. Кубасов А.Ю., Маилян Д.Р. К вопросу закрытия технологических трещин в железобетонных фермах комбинированным преднапряжением арматуры // Научное обозрение. 2015. № 10. С. 17.
4. Маилян Д.Р., Хунагов В.Х. Проектирование железобетонных конструкций равного сопротивления. Нальчик, 2015. 176 с.
5. Каприелов С.С., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кузнецов Е.Н. О регулировании модуля упругости и ползучести высокопрочных бетонов с модификатором МБ-50С // Бетон и железобетон. 2003. № 6. С. 8–12.
6. Давидюк А.Н., Маилян Д.Р., Несветаев Г.В. Самоуплотняющиеся высокопрочные и легкие бетоны на пористых заполнителях для эффективных конструкций // Технологии бетонов. 2011. № 1–2. С. 57.
7. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Самоуплотняющиеся бетоны: модуль упругости и мера ползучести // Строительные материалы. 2009. № 6. С. 68–71.
8. Несветаев Г.В., Кардунян Г.С. Модуль упругости цементного камня с суперпластификаторами и органоминеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении // Бетон и железобетон. 2013. № 6. С. 10–13.
9. Несветаев Г.В., Ву Ле Куен. Деформационные свойства бетонов классов В40–В60 из высокоподвижных смесей на материалах Вьетнама // Науковедение. 2015. Т. 7. № 3. Условия доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/78TVN315.pdf>
10. Цемент, бетоны, сухие смеси: Модуль упругости. Ч. 1 / под ред. П.Г. Комехова. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. С. 282–298.
11. Yuvaraj L. Bhirud*, Keshav K. Sangale. Comparison of shrinkage, creep and elastic shortening of VMA and powder type self-compacting concrete and normal vibrated concrete // Open Journal of Civil Engineering. 2017. V. 7 (1). P. 130–140.
12. Marian Sabau, Traian Onet, Ana Ioana Petean. Hardened properties of self-compacting concrete // First International Conference for PhD students in Civil Engineering CE-PhD. 2012. V. 1. P. 436–442.
13. Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Murtazaeva T.S.A., Khubaev M.S.M. High-quality modified concrete based on mineral additives and superplasticizers of different nature // Innovations and investments. 2015. № 8. P. 163–166.
14. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete // Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. № 1. P. 5–15.
15. Domone P.L. A review of the hardened mechanical properties of self – compacting concrete // Cement and Concrete Composition. 2007. № 1. P. 1–12.

REFERENCES

1. Mkrтчyаn A.M., Mailyаn D.R. Raschet zhelezobetonny`x kolonn iz vy`sokoprochnogo betona po nedeformirovannoj sxeme [Reinforced concrete beam analysis by non-deformed scheme]. Nauchnoe obozrenie. 2013. No. 11. Pp. 72–76. (rus)
2. Aksenov V.N., Mailyаn D.R., Aksenov N.B. Zhelezobetonny`e kolonny` iz vy`sokoprochnogo betona [Reinforced concrete columns made of high-strength concrete]. Rostov-on-Don, RGSU, 2012. 167 p. (rus)
3. Kubasov A.Yu., Mailyаn D.R. K voprosu zakry`tiya texnologicheskix treshhin v zhelezobetonny`x fermax kombinirovanny`m prednapryazheniem armatury` [Closing technological cracks in reinforced concrete girders using combined prestress of reinforcement]. Nauchnoe obozrenie. 2015. No. 10. Pp. 17. (rus)
4. Mailyаn D.R., Xunagov V.X. Proektirovanie zhelezobetonny`x konstrukcij ravnogo soprotivleniya [Design of reinforced concrete structures with equal resistance]. Nal`chik, 2015. 176 p. (rus)

5. *Kaprielov, S.S., Karpenko N.I., Shejnfel'd A.V., Kuznecov E.N.* О регулировании модуля упругости и ползучести высокопрочных бетонов с модификатором MB-50S [Control for elasticity modulus and creep of high-strength concretes with MB-50S modifier]. *Beton i zhelezobeton*. 2003. No. 6. Pp. 8–12. (rus)
6. *Davidyuk A.N., Mailyan D.R., Nesvetaev G.V.* Самуплотняющиеся высокопрочные и легкие бетоны на пористых заполнителях для эффективных конструкций [Self-compacting high-strength and lightweight concretes based on lightweight aggregates for efficient structures]. *Texnologii betonov*. 2011. No. 1–2. Pp. 57. (rus)
7. *Nesvetaev G.V., Davidyuk A.N.* Самуплотняющиеся бетоны: модуль упругости и мера ползучести [Self-compacting concretes: modulus of elasticity and creep coefficient]. *Stroitel'ny'e materialy*. 2009. No. 6. Pp. 68–71. (rus)
8. *Nesvetaev G.V., Kardumyan G.S.* Модуль упругости цементного камня с суперпластификаторами и органоминеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении [Modulus of elasticity of cement stone with superplasticizers and organomineral modifiers]. *Beton i zhelezobeton*. 2013. No. 6. Pp. 10–13. (rus)
9. *Nesvetaev G.V., Vu Le Kuen.* Деформационные свойства бетонов классов V40–V60 из высокоподвижных смесей на материалах Вьетнама [Deformation properties of B40–B60 concretes made of flow mixtures on materials from Vietnam]. *Naukovedenie*. 2015. V. 7. No. 3 Available: <http://naukovedenie.ru/PDF/78TVN315.pdf> (rus)
10. *Komoxov P.G. (Ed.)* Cement, betony, suxie smesi: Modul' uprugosti. Chast' 1 [Cements, concretes, dry mixes: Elasticity modulus. Pt 1]. St-Petersburg: Professional, 2007. Pp. 282–298. (rus)
11. *Yuvaraj L. Bhirud*, Keshav K. Sangle.* Comparison of shrinkage, creep and elastic shortening of VMA and powder type self-compacting concrete and normal vibrated concrete. *Open Journal of Civil Engineering*. 2017. V. 7. No. 1. Pp. 130–140. (rus)
12. *Marian Sabau, Traian Onet, Ana Ioana Petean.* Hardened properties of self-compacting concrete. *Proc. 1st Int. Conf. for PhD Students in Civil Engineering CE-PhD*. 2012. V. 1. Pp. 436–442.
13. *Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Murtaeva T.S.A., Khubaev M.S.M.* High-quality modified concrete based on mineral additives and superplasticizers of different nature. *Innovations and Investments*. 2015. No. 8. Pp. 163–166.
14. *Okamura H., Ouchi M.* Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003. No. 1. Pp. 5–15.
15. *Domone P.L.* A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composition*. 2007. No. 1. Pp. 1–12.

Сведения об авторах

Маилян Дмитрий Рафаэлович, докт. техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, dmailyan868@rambler.ru

Несветаев Григорий Васильевич, докт. техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, nesgrin@yandex.ru

Authors Details

Dmitry R. Mailyan, DSc, Professor, Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., 344000, Rostov-on-Don, Russia, dmailyan868@rambler.ru

Grigory V. Nesvetaev, DSc, Professor, Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., 344000, Rostov-on-Don, Russia, nesgrin@yandex.ru