



Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения

А.Д. Жуков^{1,2,3} , Е.Ю. Боброва^{2*} , И.В. Бессонов³ , А.А. Медведев^{1,4} , Б.А. Демисси¹ 

¹ Московский государственный строительный университет (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

³ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия

⁴ Российский государственный геологоразведочный университет, г. Москва, Россия

* **Контакты:** e-mail: mla-gasis@mail.ru

РЕЗЮМЕ: В областях науки, связанных со строительным материаловедением, наиболее перспективным для решения является комплекс вопросов, связанный с изучением влияния условий формирования структуры материала, в том числе и возможностей ее самоорганизации, на его свойства. Химико-физические аспекты этого влияния изучаются на микроуровне, с применением всего комплекса «тонких» исследований. При этом существуют методики, позволяющие оценить возможность возникновения наноэффектов в условиях экспериментов, реализуемых на макроуровне: на производстве или в лаборатории. Одной из подобных методик является методика, изложенная в статье. Основные положения методики сформированы на основе статистических методов проведения эксперимента и исследования технологических процессов. Эта методика позволяет значительно сократить количество проводимых опытов при сохранении адекватности полученных результатов и делает возможной дальнейшую аналитическую оптимизацию результатов и их инженерную интерпретацию. В частности с применением этой методики появляется возможность оценки совместного влияния варьируемых факторов на результат, что делает возможным выявление синергетических и антагонистических эффектов с последующей их проверкой на микроуровне с помощью исследования наноструктуры материалов.

В статье в качестве примера рассмотрена технология бетона, ориентированная на утилизацию бетонного лома в качестве заполнителя или наполнителя в строительных материалах различного назначения. Приводятся результаты научных исследований по разработке составов композиционного вяжущего на основе тонкомолотых отходов бетонного лома, минерального вяжущего, синтетических волокон и полимеров, отверждаемых в результате химического взаимодействия с компонентами бетонной смеси. Это вяжущее может быть использовано для изготовления различных стеновых элементов зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модель, оптимизация, бетон, отходы, наноструктуры, композиционный материал, технология.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медведев А.А., Демисси Б.А. Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Том 12, № 6. – С. 313–319. – DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319.

ВВЕДЕНИЕ

Создание эффективных материалов и оптимизация технологических процессов предполагает использование современных методологий как исследования условий формирования микроструктуры материала (в том числе и самоорганизующихся наноструктур), так и возможностей оценки его свойств посредством проведения экспериментов на произ-

водстве или в технологической лаборатории. Очевидным, но неявным фактором являются материальные и временные затраты на проведение экспериментов, положенных в основу создания материала или оптимизации его свойств [1–3].

Оптимизировать количество экспериментов, а следовательно, и расход материалов, энергии и затрат времени можно с использованием статистических методов организации и обработки результатов

эксперимента, математического моделирования и аналитической оптимизации получаемых результатов [4–5].

Математическое планирование эксперимента является важной составной частью решения технологических задач на ЭВМ для нахождения уравнений математических моделей технологических процессов или явлений. Корректный выбор модели или системы моделирования является, во многих случаях, основой для принятия правильных решений по реализации эксперимента как в плане достижения его результатов, так и в плане экономии затрат на его проведение. Существенны также способы организации и планирования многофакторного эксперимента: при построении неполных квадратичных и квадратичных математических моделей, с использованием полных и дробных факторных планов, соответствующим условиям оптимальности [6–8].

Получаемые в результате зависимости (уравнения регрессии или алгебраические полиномы) позволяют оценить влияние каждого из факторов на результат. В частности, применение подобных методик делает возможным оценку совместного влияния варьируемых факторов на результат [9–11]. Это позволяет оценить вероятность возникновения синергетических и антагонистических эффектов. Как показывает практика, именно подобные эффекты (эффекты от совместного влияния различных параметров процесса) и лежат в основе возникновения саморганизуемых наноструктур на микроуровне, проверка которых осуществляется уже с применением «тонких» методов исследования.

Получаемые модели и сформированная методология исследований вполне соответствуют приоритетам развития строительной отрасли, в том числе и рекомендуемому развитию цифровых технологий, формированию аналитических баз данных и компьютерной визуализации строительных процессов.

Использование цифровых методик позволяет значительно повысить надежность получения результатов в процессе и при обработке данных эксперимента, использовать статистические методики для оценки достоверности моделей и значимости влияний факторов и при этом значительно снизить материальные затраты на реализацию экспериментальных исследований. Это является пусть косвенным, но весьма значимым вкладом в повышение энергетической эффективности строительных технологий [12–14].

С другой стороны, оптимизация рецептур материала или процессов его изготовления также является формой повышения энергоэффективности и реализуется уже в прикладных задачах.

Примером подобной прикладной реализации разработанных методологий является их применение

к технологии бетона и, в частности, к утилизации отходов производства минеральных вяжущих, бетона, а также строительного лома. Необходимость утилизации подобных материалов следует, во-первых, из того, что любой отход бетонного производства содержит определенный (а точнее, неопределенный, но определяемый) процент непрореагировавшего портландцемента, а, во-вторых, необходимость сохранения подобного лома приводит к отчуждению значительных территорий, что отрицательно сказывается на экологических параметрах окружающей среды и снижает возможность полезного использования подобных территорий.

Мировой и отечественный опыт утилизации отходов свидетельствует о возможности использования бетонного лома в дорожных отсыпках, для нивелирования территорий или в качестве заполнителя или наполнителя в строительных материалах различного назначения [15–17]. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований, направленных на разработку методики подбора составов композиционного материала на основе тонкомолотых отходов бетонного лома, минерального вяжущего и суперпластификатора, осуществляемых с применением статистических методов.

Основой эксперимента, на примере которого рассматривается реализация статистических методов, стало предположение, что повышение прочности и стойкости бетонов может быть обеспечено за счет улучшения качества контактной зоны и применения полимеров, повышающих эластичность формирующихся контактов. Это достигается предварительной обработкой заполнителя комплексной добавкой, а также использованием полимер-полиуретановой группы, отверждаемых парами влаги, содержащимися в воздухе.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Методология эксперимента базируется на системном анализе, включающем следующие элементы:

- исследование технологии, процессов ее составляющих;
- изучение рецептур и составов композиций и сырьевых материалов;
- ситуационный анализ и выбор типа модели;
- разработка стратегии планирования эксперимента, выбор факторов, откликов и параметра оптимизации;
- проведение и обработка результатов эксперимента, а также проверка статистических гипотез;
- оптимизация результатов эксперимента;
- инженерная интерпретация результатов эксперимента.

За основу исследований принята методика НИУ МГСУ, в основу которой положено проведение эксперимента в три этапа с аналитической оценкой результатов (четвертый этап) [18, 19]. На первом этапе проводится комплексный анализ объекта исследований: технологии в целом или отдельные ее компоненты, в том числе связанные с решением рецептурных вопросов (подбором состава исходных композиций, например). Факторы влияния разделяют на две группы: детерминированные (значение может быть точно установлено для каждой ситуации) и варьируемые (изменение которых может быть оценено методами математической статистики).

На втором этапе осуществляется эксперимент (активный, пассивный или комбинированный), в котором задействованы все установленные варьируемые факторы. Факторы в эксперименте (X_1, X_2, \dots, X_n) используют в кодированном виде, то есть приведенными к интервалу $[-1, +1]$. Например, дробная реплика от полного трехфакторного эксперимента (2^3) позволяет оценить линейное влияние 7 факторов, а полного четырехфакторного эксперимента – линейное влияние 14 факторов.

Серии опытов реализуют по плану, матрица которого представляет собой дробную реплику неполного квадратичного уравнения более высокого порядка. При этом коэффициентам при смешанных взаимодействиях присваивается значение варьируемых факторов.

По факту проведения эксперимента и обработки его результатов получают уравнения регрессии, в которых влияние каждого фактора на результат оценивается по коэффициенту при X_1, X_2, \dots, X_n . В итоге определяют группу наиболее значимых факторов, имеющих наибольшие по абсолютному значению коэффициенты (как правило, от трех до пяти коэффициентов).

На третьем этапе проводят серии опытов, план которых построен на основе матрицы полного квадратичного 3...5 факторного эксперимента (по числу отобранных наиболее значимых факторов). Полученные уравнения регрессии проверяют по всем статистическим гипотезам и осуществляют проверку адекватности моделей по критерию Фишера. В результате статистических проверок в результате сравнения с доверительными интервалами (Δh_j) оставляют только значимые факторы, а в результате проверки по критерию Фишера делают вывод об адекватности (или неадекватности) полученных моделей.

На четвертом этапе осуществляется анализ полученных уравнений и оценка влияния варьируемых факторов на результат, аналитическая оптимизация уравнений регрессии и инженерная интерпретация результатов.

Оценка влияния каждого фактора на результат осуществляется по величине и знаку коэффициента,

стоящего перед фактором (его линейным значением или квадратичной функцией) или их парным взаимодействием. Необходимо отметить, что эксперимент проводится в кодированных значениях факторов (приведенных к интервалу $[-1, +1]$), поэтому коэффициенты при парных взаимодействиях позволяют делать вывод только о совместном влиянии этих факторов на результат и направлении этого влияния, а также возможности, но не о величине синергетических или антагонистических эффектов. Эти эффекты могут быть выявлены только при использовании натуральных значений факторов в уравнении регрессии.

Интерполяция результатов заключается в определении расчетным путем прочности и средней плотности материала в зависимости от значений варьируемых факторов и осуществляется путем реализации программ для ЭВМ. Такая программа включает блоки ввода данных (значений факторов в натуральном выражении), блок кодирования факторов, расчетный блок, блок вывода результатов на дисплей.

Оптимизация уравнений осуществляется аналитическим методом, который базируется на следующих положениях: полученные уравнения регрессии адекватно описывают изучаемый технологический процесс; каждое уравнение является алгебраической функцией нескольких переменных (по числу значимых варьируемых факторов), и для исследования этой функции применимы методы математического анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам реализации первого и второго этапов, в качестве варьируемых факторов приняты расходы цемента, тонкомолотых отходов, отсева, пластификатора и армирующего компонента. Расход воды устанавливается в соответствии с В/Ц и не является независимым фактором. Функциями отклика приняты прочность бетона при сжатии (Y_1) и его средняя плотность (Y_2).

В качестве параметра оптимизации на третьем этапе проведения эксперимента принят коэффициент конструктивного качества бетона (ККК), равный отношению прочности при сжатии бетона (Y_1) к его средней плотности (Y_2):

$$\text{ККК} = (Y_1)/(Y_2).$$

Условия эксперимента третьего этапа представлены в табл. 1. Расход армирующего компонента принят постоянным и равен 1.0%.

Математическая обработка результатов эксперимента позволила получить уравнения регрессии для прочности при сжатии (Y_1) и средней плотности (Y_2). Значимость коэффициента проверялась по довери-

Таблица 1.

Интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Символ X_i	Среднее значение фактора, \bar{X}_i	Интервал варьирования, ΔX_i	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Расход портландцемента, кг/м ³	X_1	450	50	400	500
Расход пластификатора, кг/м ³	X_2	2	0,5	1,5	2,5
Расход тонкомолотых отходов, кг/м ³	X_3	650	50	600	700

тельным интервалам, соответственно доверительный интервал для прочности составил $\Delta b_1 = 0.8$ МПа, а для средней плотности $\Delta b_2 = 3$ кг/м³.

Получены следующие математические модели (полиномы):

– для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 32.7 + 3.7X_1 + 1.6X_2 + 1.9X_3 + 1.5X_1X_3 - 1.1X_2^2;$$

– для средней плотности:

$$Y_2 = 1930 + 52X_1 + 24X_2 + 32X_3 + 11X_1X_3 - 6X_2^2.$$

Полученные модели проверены на адекватности по критерию Фишера. Расчетные значения критериев Фишера равны для модели средней плотности $F_1 = 15,2$ и для модели прочности при сжатии $F_2 = 15,7$. Табличные же значения критериев, соответственно, равны 19,2 и 19,3. Рассчитанные значения F -критерия не превышают табличного, и с соответствующей доверительной вероятностью (98%) модель можно считать адекватной. Этот факт будет учтен при аналитической оптимизации математических моделей.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ коэффициентов уравнения $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$ показывает, что прочность композиционного вяжущего увеличивается при увеличении расходов портландцемента, пластификатора и тонкомолотого вторичного бетона в интервалах, принятых в эксперименте (положительные коэффициенты при X_1, X_2, X_3). При увеличении расходов полимера вначале имеет место рост прочности, а затем при больших расходах наблюдается снижение (коэффициенты при X_2 и X_3^2). Это позволяет предположить, что функция $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$ имеет локальный экстремум по X_2 , и возможно применение аналитической оптимизации.

Анализ коэффициентов уравнения $Y_2 = f_2(X_1, X_2, X_3)$ показывает, что наибольшее влияние на увеличение плотности бетона оказывают увеличение расхода портландцемента и отсева (коэффициенты при X_1

и X_3). Увеличение расхода пластификатора способствует повышению плотности: сначала интенсивному, а при больших расходах – незначительному.

Для уравнений и прочности и средней плотности значимым является парное взаимодействие при X_1X_3 . Знак «плюс» при значении фактора парного взаимодействия позволяет предположить возможность наличия эффекта совместного усиления влияния на результат, обусловленного взаимодействием мелкодисперсных фаз вяжущего и вторичного бетона, содержащего в некотором количестве непрореагировавшие клинкерные минералы.

Рассматриваемая методика, в основу которой положена кибернетическая система, именуемая «черный ящик», ограничивается только внешними взаимодействиями и получением зависимостей, связывающих результат и варьируемые факторы, но не рассматривающая внутренние процессы, происходящие в подобных системах.

Результаты исследований отечественных и зарубежных ученых показывают, что в подобных высокодисперсных системах могут проявляться эффекты за счет взаимодействия компонентов на микроуровне с созданием организованных структур. Если эффекты направлены на улучшение свойств материала, то целью «тонких» исследований является изучение возможности рецептурного или технологического усиления этих эффектов за счет формирования самоорганизующихся наноструктур, если эффект взаимодействия направлен на ухудшение свойств, то необходимы исследование минимизирующие, в данном случае, фактор отрицательного влияния. В этом случае уже является необходимым применение всего аппарата и методологии исследований наноструктур.

Можно сказать, что применение статистических методов выполняют функцию «ножниц» (или лезвия) Оккама, позволяющих отсечь лишнее на технологической стадии без обращения к «тонким» дорогостоящим исследованиям.

В частности, по данным экспериментов по модифицированному бетону с использованием отходов,

проведенных в технологической лаборатории установлено, что для прочности и средней плотности значимым является парное взаимодействие при X_1X_3 , что говорит о возможном синергетического эффекте, обусловленном взаимодействием мелкодисперсных фаз вяжущего и отходов бетона, содержащего в некотором количестве непрореагировавшие клинкерные минералы. Соответственно направлениями дальнейшего научного поиска является изучение возможности формирования наноструктур при взаимодействии компонентов вяжущего и тонкомолотого вторичного бетона.

Анализ полинома, описывающего взаимосвязь между прочностью при сжатии и варьируемыми факторами, показывает, что эта функция (по своей сути являющаяся функцией нескольких переменных) по одной из этих переменных, а именно по расходу полимера (X_2), имеет локальный экстремум. Поэтому мы можем воспользоваться математическим аппаратом аналитической локальной оптимизации.

Аналитическая оптимизация основана на том, что функции для прочности и плотности $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$ и $Y_2 = f_2(X_1, X_2, X_3)$ – математические, и к ним допустимо применение методов математического анализа при условии, что не будет нарушаться условие адекватности. В рассматриваемом случае принята следующая схема:

- уравнение $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$ дифференцируют по X_2 и приравнивают к нулю, определяя экстремум функции Y_1 по X_2 ;
- решают функции $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$ и $Y_2 = f_2(X_1, X_2, X_3)$ при $X_2 = \text{opt}$ и осуществляют локальную оптимизацию.

Аналитическая оптимизация включает следующую последовательность действий:

1) Определяем величину локального экстремума функции $Y_1 = f_1(X_1, X_2, X_3)$ по X_2 :

$$\partial Y_1 / \partial X_2 = 1.6 - 2.2X_2 = 0 \rightarrow X_2 = 1.6 / 2.2 = 0.73.$$

2) Рассчитываем величину натурального значения расхода пластификатора (соответствующего возможному получению максимальной прочности при сжатии полимербетона), используя формулу декодирования фактора:

$$\bar{X}_2 = \bar{X}_2 + \Delta X_2 \cdot 0.73 = 2.0 + 0.5 \cdot 0.73 = 2.36 \pm 0.02 \text{ kg/m}^3.$$

3) Рассчитываем математические модели (полиномы) для оптимизированного значения фактора $X_2 = 0.73$:

- для прочности при сжатии: $Y_1 = 33.5 + 3.7X_1 + 1.6X_3 + 1.5X_1X_3$;
- для средней плотности: $Y_2 = 1944 + 52X_1 + 32X_3 + 11X_1X_3$.

Графическая интерпретация полученных зависимостей заключается в представлении полученных зависимостей $Y_1 = f_3(X_1, X_3)$ и $Y_2 = f_4(X_1, X_3)$ при оптимизированном значении X_2 в декартовой системе координат (X_1, X_3) и функции отклика в качестве изменяемого параметра: $X_1 = \varphi_1(X_3, Y_1)$ и $X_1 = \varphi_2(X_3, Y_2)$. Далее переходят от кодированных значений варьируемых факторов к натуральным значениям факторов.

Интерполяционные решения на всей области изменения расхода портландцемента и расхода тонкомолотых отходов (факторов X_1, X_3) при оптимизированном значении фактора X_2 (оптимальный расход пластификатора $2,36 \pm 0,02 \text{ кг/м}^3$) представлены графически (рис. 1) в виде номограммы.

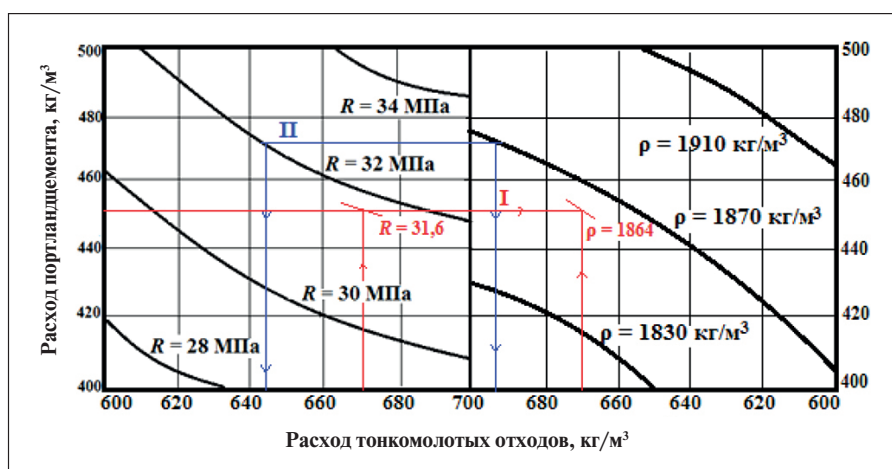


Рис. 1. Номограмма для оценки свойств бетона на основе отходов его по составу (пример I) и определения расхода портландцемента и тонкомолотых отходов для бетона с заданной прочностью и плотностью (пример II)

Номограмму можно использовать для прогнозирования свойств или подбора состава отделочного бетона, решая прямую (пример I) или обратную задачи (пример II).

Например, чтобы оценить свойства полимербетона с содержанием тонкомолотых отходов 670 кг/м^3 и расходом портландцемента 450 кг/м^3 , необходимо выполнить действия, показанные красной линией рис. 3 (пример I); прочность при сжатии ($R = 31,6 \text{ МПа}$) и среднюю плотность бетона ($\rho = 1864 \text{ кг/м}^3$) определяем интерполяцией. Чтобы получить расход компонентов полимербетона с задаваемыми прочностью при сжатии $R = 32 \text{ МПа}$ и средней плотностью 1870 кг/м^3 , необходимо выполнить действия, показанные синей линией на рис. 1 (пример II). Получаем расход портландцемента 472 кг/м^3 , а допустимый расход тонкомолотых отходов – 645 кг/м^3 . Далее осуществляем контрольные замесы и проверяем экспериментальным путем полученные расчетные данные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Применение статистических методов, методология планирования и обработки результатов эксперимента позволяет получать математические зависимости (модели) и предполагает проверку как основных статистических гипотез, так и значимости коэффициентов и эффектов от их парных взаимодействий и таким образом делает возможным прогнозирование дальнейших исследований на всех уровнях.

Если эффекты направлены на улучшение свойств материала, то целью исследований следующего этапа является изучение возможности рецептурного или технологического усиления этих эффектов за счет формирования самоорганизующихся наноструктур. Если эффект взаимодействия направлен на ухудшение

свойств, то необходимы исследования, минимизирующие, в данном случае, фактор отрицательного влияния. В этом случае является необходимым применение всего аппарата и методологии исследований самоорганизующихся наноструктур, взаимодействия на уровне которых и могут являться причиной выявленных макроэффектов.

Если системы высокодисперсные, то в таких системах могут проявляться эффекты за счет взаимодействия компонентов на микроуровне с созданием организованных структур. По данным экспериментов по модифицированному бетону с использованием отходов, проведенных в технологической лаборатории, установлено, что для прочности и средней плотности значимым является парное взаимодействие, что говорит о возможном синергетическом эффекте, обусловленном взаимодействием мелкодисперсных фаз вяжущего и отходов бетона, содержащего в некотором количестве непрореагировавшие клинкерные минералы. Соответственно направлением дальнейшего научного поиска является изучение возможности формирования наноструктур при взаимодействии компонентов вяжущего и тонкомолотого вторичного бетона.

Изложенная в статье методология эксперимента опробована при анализе технологий и подбору рецептур различных строительных материалов, в том числе вяжущих и бетонов на основе вторичных продуктов и отходов, получаемых в результате реновации выведенных из жилого фонда объектов. Получаемые результаты и формируемые при этом базы данных вполне соответствуют рекомендациям по цифровизации строительных технологий.

Результаты научных исследований по разработке составов композиционного вяжущего позволяют сформировать основы подбора его состава композиционного вяжущего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
2. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 192 с.
3. Румянцев Б.М. Эксперимент и моделирование при создании новых изоляционных и отделочных материалов [Электронный ресурс]: монография / Б.М. Румянцев, А.Д. Жуков. – Электрон. текстовые данные. – М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2013. – 156 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/23755>. – ЭБС «IPRbooks», по паролю ISBN: 978-5-7264-0700-5.
4. Жуков А.Д., Чугунков А.В. Локальная аналитическая оптимизация технологических процессов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 1–2. – С. 273–278.
5. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир. – 1982. – 235 с.
6. Жуков А.Д. Технологическое моделирование [Электронный ресурс]: учебное пособие / Жуков А.Д. – Электрон. текстовые данные. – М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2013. – 204 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/20041>. – ЭБС «IPRbooks», по паролю ISBN: 978-5-7264-0780-7.

7. Хартман К. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 544 с.
8. Жуков А.Д. Решение технологических задач методами математического моделирования / А.Д. Жуков, А.В. Чугунков, В.А. Рудницкая. – Монография. – М.: Изд. МГСУ, 2011. – 176 с.
9. Писаренко Ж.В., Иванов Л.А., Ванг Ц. Нанотехнологии в строительстве: современное состояние и тенденции развития // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Том 12, № 4. – С. 223–231. – DOI: [10.15828/2075-8545-2020-12-4-223-231](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-4-223-231).
10. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete – A review. Construction and Building Materials. 2010. V. 24. Pp. 2060–2071. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014).
11. Velichko E., Shokodko E. Reactive powder concrete based on multicomponent cement systems with multilevel optimization of the disperse composition. MATEC Web of Conferences 251, 01042 (2018). DOI: [10.1051/mateconf/201825101042](https://doi.org/10.1051/mateconf/201825101042).
12. Муртазаев С.-А.Ю. Мелкозернистые бетоны на основе наполнителей из вторичного сырья: научное издание / С.-А.Ю. Муртазаев, Д.К.-С. Батаев, З.Х. Исмаилова. – М.: Комтехпринт, 2017. – 142 с.
13. Мешков П.И., Мокин В.А. Способы оптимизации составов сухих строительных смесей // Строительные материалы. – 2000. – № 5. – С. 12–14.
14. Жуков А.Д. Практикум по технологическому моделированию [Электронный ресурс]: учебное пособие / Жуков А.Д., Смирнова Т.В., Гудков П.К. – Электрон. текстовые данные. – М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2014. – 168 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/30351>. – ЭБС «IPRbooks», по паролю ISBN: 978-5-7264-0903-0.
15. Zhukov A., Shokodko E., Bobrova E., Bessonov I., Dosanova G., Ushakov N. (2019) Interior Acoustic Materials and Systems // EMMFT-2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 983. Springer, Cham.pp. 740–747. DOI: [10.1007/978-3-030-19868-8_72](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_72).
16. Ефименко А.З., Пилипенко А.С. Получение декоративных отделочных материалов для фасадных систем на заполнителях из бетонных отходов // Вестник МГСУ. – 2009. – Специальный выпуск. – С. 100–103.
17. Горбунов Г.И. Научные основы формирования структуры и свойств строительных материалов [Электронный ресурс]: монография / Г.И. Горбунов, А.Д. Жуков. – Электрон. текстовые данные. – М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016. – 555 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/49870>. – ЭБС «IPRbooks», по паролю ISBN: 978-5-7264-1318-1.
18. Zhukov A., Shokodko E. (2020) Mathematical Methods for Optimizing the Technologies of Building Materials // VII International Scientific Siberian Transport Forum. Trans Siberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, V. 1116. Pp. 413–421. Springer, Cham. DOI: [10.1007/978-3-030-37919-3_40](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_40).
19. Bessonov I., Zhukov A., Shokodko E., Chernov A. Optimization of the technology for the production of foam glass aggregate // TPACEE 2019, E3S Web of Conferences. Vol. 164, 14016 (2020). Published on-line: 05 May 2020. DOI: [10.1051/e3sconf/202016414016](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016414016).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Алексей Дмитриевич, доцент, к.т.н., доцент кафедры Строительных материалов и материаловедения НИУ МГСУ, ведущий научный сотрудник НИИ строительной физики (НИИСФ РААСН), заместитель директора НОЦ комплексной модернизации инфраструктуры ЖКХ института ГАСИС НИУ ВШЭ, член-корреспондент Российской инженерной академии (РИА), г. Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0593-3259>, e-mail: lj211@yandex.ru

Боброва Екатерина Юрьевна, к.э.н., советник директора Института строительства и жилищно-коммунального хозяйства Государственной академии специалистов инвестиционной сферы Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6541-4552>, e-mail: m1a-gasis@mail.ru

Бессонов Игорь Вячеславович, к.т.н., главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, советник Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), г. Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9234-4075>, e-mail: bessonoviv@mail.ru

Медведев Андрей Александрович, доцент, к.т.н., доцент кафедры прикладной математики НИУ МГСУ, доцент кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета, г. Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2930-2606>, e-mail: medvedev747@yandex.ru

Демисси Бекеле Арега, магистр строительства, аспирант кафедры Строительных материалов и материаловедения НИУ МГСУ, г. Москва, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1689-7003>, e-mail: aregabekalu@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 02.11.2020.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 28.11.2020.

Статья принята к публикации: 03.12.2020.