

№5 (10)  
**2022**

# Инженерные --- ИССЛЕДОВАНИЯ

ISSN 2782-5582

## СОДЕРЖАНИЕ

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ <b>Д.В. Бородин, С.С. Рябова</b> .....	3-11
ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЫСОТНОГО СООРУЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ <b>Ш.О. Худайназаров</b> .....	12-17
УСКОРИТЕЛИ СХВАТЫВАНИЯ И ТВЕРДЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ <b>Я.А. Олехнович, К. Шукшев</b> .....	18-24
ВЫБОР ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ АЛЬТЕРНАТИВ <b>Д.Е. Цыпленков</b> .....	25-30
ПУТИ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЗДАНИЙ МО РФ ЗА СЧЕТ УВЕЛИЧЕНИЯ УРОВНЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ <b>Е.А. Тюрин, М.Ю. Попов, Д.В. Бородин, А.И. Шашков</b> .....	31-36

## CONTENTS

THE POSSIBILITIES OF USING NEURAL NETWORKS IN BUILDING MATERIALS SCIENCE <b>D.V. Borodin, S.S. Ryabova</b> .....	3-11
DYNAMIC CALCULATION OF A HIGH-RISE STRUCTURE TAKING INTO ACCOUNT NONLINEAR VISCOELASTIC PROPERTIES OF THE MATERIAL UNDER VARIOUS KINEMATIC INFLUENCES <b>Sh.O. Khudainazarov</b> .....	12-17
ACCELERATORS AND HARDENING OF CONCRETE MIXTURES <b>Y.A. Olekhnovich, K. Shukshev</b> .....	18-24
SELECTION OF THE HEAT-INSULATING MATERIAL ON THE BASIS OF THE METHOD OF MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF ALTERNATIVES <b>D.E. Tsyplenkov</b> .....	25-30
THE WAYS OF DECREASING THE COST ON THE OPERATION OF BUILDINGS AND OF DEFENSE MINISTRY OF THE RUSSIAN FEDERATION BY INCREASING THE LEVEL OF HEAT DEFENSE OF OUTER CONSTRUCTIONS <b>E.A. Turin, M.U. Popov, D.V. Borodin, A.I. Shashkov</b> .....	31-36

УДК 693.543.5

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

**Д.В. Бородин, С.С. Рябова**

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

**Аннотация.** В работе показана возможность применения нейронных сетей в строительстве. Приведены примеры такого использования. Рассмотрены преимущества развития методов нейросетевого моделирования применительно к решению строительных задач. Приведены особенности нейросетевых методов обработки данных. Показаны возможности применения Neural Network Start (NNStart) пакета расширения программного комплекса MATLAB для решения различных задач. Описан процесс решения задачи регрессии с применением нейросети в данной программе. Показаны группы входных данных для полносвязной нейросети прямого распространения (Feed Forward NN). Рассмотрены основные алгоритмы обучения такой сети. Приведен нейросетевой прогноз (с одним слоем скрытых нейронов) величины прочности жаростойкого пенобетона в зависимости от изменения количества его компонентов. Проведен сравнительный анализ качества работы нейронной сети, смоделированной в программном комплексе MATLAB в зависимости от заданного количества нейронов в скрытом слое и выбранном способе обучения сети.

**Ключевые слова:** нейронные сети, машинное обучение, обучение сети, задача регрессии, жаростойкий пенобетон, нейросеть прямого распространения, MATLAB, NNStart, FNN.

**Ссылка для цитирования:** Бородин Д.В., Рябова С.С. Возможности применения нейронных сетей в строительном материаловедении // Инженерные исследования. 2022. №5 (10). С. 3-11. EDN: BMLSFT

## THE POSSIBILITIES OF USING NEURAL NETWORKS IN BUILDING MATERIALS SCIENCE

**D.V. Borodin, S.S. Ryabova**

*Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, St.Petersburg (Russian Federation)*

**Abstract.** The paper shows the possibility of using neural networks in construction. Examples of such use are given. The advantages of the development of neural network modeling methods in relation to solving construction problems are considered. The features of neural network methods of data processing are given. The possibilities of using Neural Network Start (NNStart) of the MATLAB software package extension for solving various tasks are shown. The process of solving the regression problem using a neural network in this program is described. Groups of input data for a fully connected neural network of direct propagation (Feed Forward NN) are shown. The basic algorithms of training such a network are considered. A neural network forecast (with one layer of hidden neurons) of the strength of heat-resistant foam concrete, depending on the change in the number of its components, is given. A comparative analysis of the quality of the neural network modeled in the MATLAB software package, depending on the specified number of neurons in the hidden layer and the selected method of network training, is carried out.

**Keywords:** neural networks, machine learning, network learning, regression problem, heat-resistant foam concrete, direct propagation neural network, MATLAB, NNStart, FNN.

**For citation:** Borodin D.V., Ryabova S.S. The possibilities of using neural networks in building materials science // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.5 (10). Pp. 3-11. EDN: BMLSFT

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более широкое применение в различных сферах и областях приобретают различные методы машинного обучения, а в частности нейронные сети. Однако в строительстве применение данных подходов остается недостаточно развито и распространено, несмотря на то что их применение может качественно улучшить и упростить целый ряд строительных процессов.

В строительстве возможно использование методов машинного обучения для прогнозирования категории технического состояния несущих конструкций зданий и сооружений по наличию в них дефектов, оценивания риска наступления аварийного состояния конструкции, оперативного составления планов и определения потребности в ресурсах для устранения неисправностей, определения физико-механических свойств материалов в зависимости от условий их производства и эксплуатации, оценка компетентности подрядчиков, проведение непредвзятого конъюнктурного анализа сметных расценок и множества других задач.

В статье [1] рассмотрены нейросетевые методы оценки затрат на научно-исследовательские и проектно-изыскательские работы при строительстве автомобильных дорог, позволяющие на основе данных по запроектированным ранее объектам произвести ранжирование ценообразующих факторов по степени их влияния на цену научно-исследовательских и проектно-изыскательских работ, выполняемых для проектов государственно-частного партнерства.

Создана программа, предназначенная для использования в автоматизированной системе предупреждения осложнений при строительстве нефтяных и газовых скважин. Которая способна по показаниям с разных датчиков и общей оценке обстановки заранее прогнозировать осложнения в процессе бурения и принимать превентивные меры по их предотвращению [2].

В монографии [3] излагается метод определения причин появления трещин в конструкциях зданий, который основывается на нечетких правилах. В ней развиваются идеи профессора А. П. Ротштейна по медицинской диагностике на нечеткой логике [4] и по теории генетико-нечеткой идентификации [5] с учетом специфики объекта диагностирования – трещин строительных конструкций.

В диссертации [6] реализован, адаптированный к задаче определения категории технического состояния железобетонной изгибаемой конструкции, базирующийся на нечеткой логике, алгоритм. Эта технология позволяет дать строгое математическое описание расплывчатых утверждений и реализует попытку преодолеть лингвистический барьер между человеком и компьютером. Сформулированы предпосылки эффективности использования нейросетевых подходов к проблемам строительства. [7] Показаны примеры решения задач теории упругости и пластичности, строительной механики и строительных конструкций с помощью нейронных сетей [8, 9].

## МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

Единого определения для термина машинное обучение пока нет. Но большинство исследователей формулируют его примерно так. Машинное обучение - это наука о том, как заставить искусственный интеллект (ИИ) учиться и действовать как человек, а также сделать так, чтобы он сам постоянно улучшал свое обучение и способности на основе предоставленных нами данных о реальном мире. Искусственная нейронная сеть (далее - нейросеть или ИНС) - математическая модель, а также её программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма. Нейросеть является одним из видов машинного обучения [10].

Изначально компьютеры использовались для задач, алгоритм решения которых был известен человеку. И только в последние годы пришло понимание, что они могут находить способ решать задачи, для которых алгоритма решения нет или он не известен. Так появился искусственный интеллект в широком смысле и технологии машинного обучения, в частности. С помощью машинного обучения ИИ может анализировать данные, запоминать информацию, строить прогнозы, воспроизводить готовые модели и выбирать наиболее подходящий вариант из предложенных. Особенно полезны такие системы там, где необходимо выполнять огромные объемы вычислений: например, банковский скоринг (расчет кредитного рейтинга), аналитика в области маркетинговых и статистических исследований, бизнес-планирование, демографические исследования, инвестиции, поиск фейковых новостей и мошеннических сайтов. В сфере инвестиций алгоритмы на базе машинного обучения анализируют рынок, отслеживают новости и подбирают активы, которые выгоднее всего покупать именно сейчас. При этом с помощью предикативной аналитики система может предсказать, как будет меняться стоимость тех или иных акций за конкретный период и корректирует свои данные после каждого важного события в отрасли. Процесс машинного обучения, вообще то, выглядит следующим образом. Есть большое число однотипных задач, в которых

известны условие и правильный ответ или один из возможных ответов. Модель машинного обучения, например, глубинная нейронная сеть, работает по принципу «черного ящика», который принимает на вход условие задачи, а на выходе выдает произвольный ответ. У «черного ящика» есть дополнительные параметры, которые влияют на то, как будет обрабатываться входной сигнал. Процесс обучения нейросети заключается в поиске таких значений параметров, при которых она будет выдавать ответ, максимально близкий к правильному. Когда мы настроим параметры нужным образом, нейросеть сможет правильно (или максимально близко к этому) решать и другие задачи того же типа - даже если никогда не знала ответов к ним.

Нейросетевые методы обработки данных имеют ряд качественных особенностей, основными из которых, применительно к строительной сфере, можно назвать:

– Решение задач при неизвестных закономерностях. Используя способность обучения на множестве примеров, нейронная сеть способна решать задачи, в которых неизвестны закономерности развития ситуации и зависимости между входными и выходными данными. Здесь стоит отметить теорему универсальности, которая звучит следующим образом: теоретически нейросеть всего с одним скрытым слоем способна аппроксимировать любую функцию с любой точностью при достаточном количестве нейронов скрытого слоя [11]. Стоит отметить, что решение получается непрерывным, то есть отобразить разрыв функции невозможно. Увеличение количества слоев в свою очередь увеличит точность аппроксимации. Примером применения такого метода в строительном материаловедении может быть определение характеристики жаростойкого материала (например, прочность пенобетона) по данным состава и технологических факторов, совместное влияние которых на прочность неизвестно.

– Адаптивное к изменениям окружающей среды. Нейронные сети обладают способностью адаптироваться к изменениям окружающей среды. В частности, нейронные сети, обученные действовать в определенной среде, могут быть легко переучены для работы в условиях незначительных колебаний параметров среды. Более того, для работы в нестационарной среде (где статистика изменяется с течением времени) могут быть созданы нейронные сети, переучивающиеся в реальном времени. Чем выше адаптивные способности системы, тем более устойчивой будет ее работа в нестационарной среде. При этом следует заметить, что адаптивность не всегда ведет к устойчивости; иногда она приводит к совершенно противоположному результату. Например, адаптивная система с параметрами, быстро изменяющимися во времени, может также быстро реагировать и на посторонние возбуждения, что вызовет потерю производительности. Для того чтобы использовать все достоинства адаптивности, основные параметры системы должны быть достаточно стабильными, чтобы можно было не учитывать внешние помехи, и достаточно гибкими, чтобы обеспечить реакцию на существенные изменения среды. Например, если в ходе исследования взаимосвязи прочности жаростойкого пенобетона с предполагаемыми факторами выясняется, что появляются дополнительные не учтенные ранее причины (например, влияет теплофизика), то есть возможность доучить нейросеть

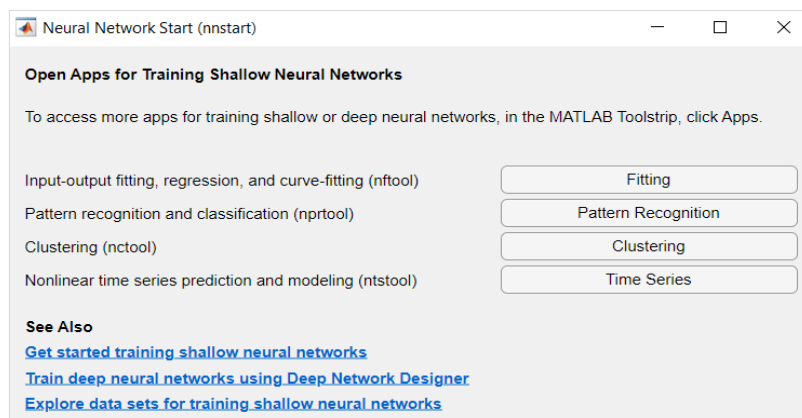
– Потенциальное быстрое действие. Процесс обучения нейросети на большом массиве данных происходит достаточно долго. Однако обученная нейросеть обладает потенциальным сверхвысоким быстрым действием за счет использования массового параллелизма обработки информации и способна с высокой скоростью решать поставленные задачи, например, оперативного определения категории технического состояния конструкций

– Учет «совокупности» факторов. Нейросеть способна учесть зависимость влияния каждого входного параметра на выходной результат от совокупности влияния остальных параметров, когда при обычной оценке эти влияния могут казаться независимыми. Иными словами, она может учесть влияние входных параметров друг на друга и учесть это влияние в своей работе.

В данной работе для решения задачи определения прочности жаростойкого пенобетона в зависимости от состава смеси использован программный комплекс MATLAB, в частности встроенный в него пакет Neural Network Start.

MATLAB - пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений. Neural Network Start (NNStart) – упрощенная версия пакета расширения MATLAB, содержащая средства для моделирования, проектирования, разработки и визуализации искусственных нейронных сетей (ИНС).

Запуск пакета NNStart производится командой nnstart. После чего программа открывает диалоговое окно с выбором варианта задачи, которую мы будем решать с помощью ИНС.



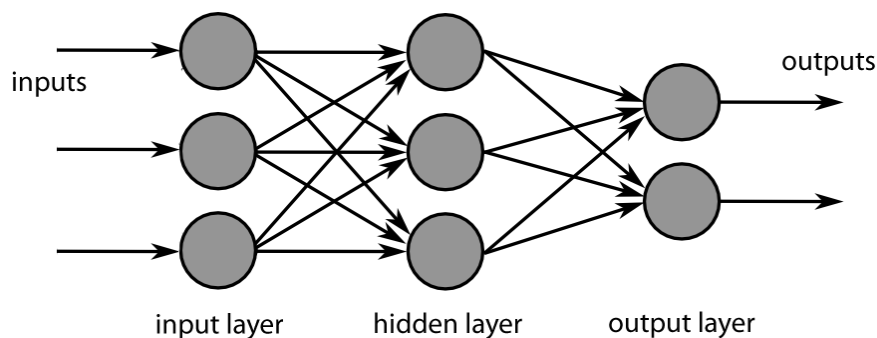
**Рис. 1.** Выбор задачи  
**Fig. 1.** Task selection

Программа позволяет решать задачи: Fitting - регрессии, аппроксимации кривой; Pattern Recognition - распознавания образов (для работы с изображениями); Clustering – кластеризация, или обработка размеченных данных для поиска закономерностей и объединения объектов в группы по каким-то признакам; Time Series – аппроксимация временных рядов (для прогнозирования во времени).

#### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

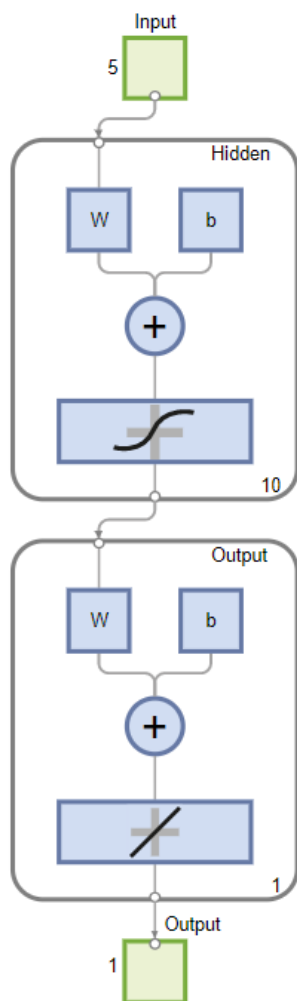
Будем решать задачу регрессии, поэтому выбираем первый тип задачи Fitting. После выбора задачи программа создаст схему структуры сети, и позволит выбрать основные параметры.

Типовой вариант архитектуры для решения задач данного вида – Feed Forward NN (FNN). Полносвязная нейросеть прямого распространения, в которой каждый нейрон последующего слоя связан со всеми нейронами предыдущего. Она хорошо подходит для решения задач такого типа, хотя и имеет определенные недостатки, которые необходимо учитывать при решении более масштабных задач.



**Рис. 2.** Схема FNN сети  
**Fig. 2.** FNN network diagram

В нашем случае имеем нейронную сеть с одним входным, одним скрытым и одним выходным слоем. Функция активации скрытого слоя – сигмовидная  $y(a) = \frac{1}{1+e^{-a}}$ , выходного – линейная  $y(a) = a$ .



**Рис. 3.** Схема структуры ИНС  
**Fig. 3.** Diagram of the structure of ANN

Для обучения и проверки сети в работе используются экспериментально полученные данные, которые отражают значение прочности жаростойкого пенобетона в зависимости от количества (в граммах) добавленных в смесь компонентов. Во всех случаях общий состав смеси оставался неизменным за исключением 5 компонентов, которые мы в тех или иных количествах добавляли в смесь (табл.1).

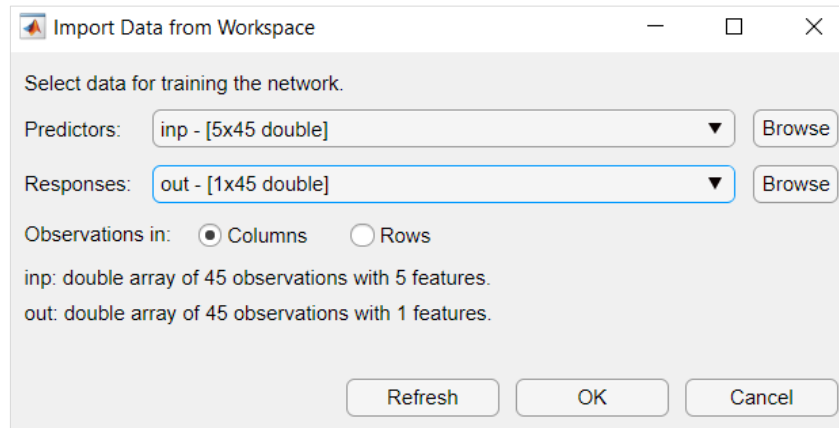
Таблица 1. Перечень добавок  
 Table 1. List of additives

Название компонента	Минимальное количество, грамм	Максимальное количество, грамм
Шлак тонкомолотый	10	78
Шамот	26	51
Водоцементное отношение 0,45	218	268
Суперпластификатор	0,5	1,5
Нанодобавка	0,5	2,9

Для работы с ИНС было экспериментально получено 45 значений входных и связанных с ними выходных данных. Входные – столбец, содержащий в себе 5 численных значений, каждому из которых соответствует количество (грамм) вещества добавленного в смесь. Выходные – одно значение, соответствующее реальному значению прочности ( $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ ) жаростойкого пенобетона после твердения. Все данные были занесены в таблицу Excel, нормализованы, то есть приведены к значениям от 0 до 1 и размещены в удобном для дальнейшего использования программой порядке.



На следующем этапе работы мы импортируем наши данные из Excel в рабочее пространство MATLAB создавая 2 нумерованные матрицы, input (inp) 5x45, и output (out) 1x45 содержащие в себе соответственно данные из входной и выходной таблиц. Из пространства MATLAB повторно импортируем данные в пакет NNStart, указывая какие данные будут входом, а какие выходом.



**Рис.4.** Импорт данных в ИНС  
**Fig.4.** Importing data into ANN

После импорта данных задаем количество нейронов в скрытом слое и выбираем способ обучения сети, данные параметры выбираются методом проб и ошибок, путем анализа качества работы сети в разных вариантах. Предлагаемые способы обучения это:

1. Алгоритм Байесовской регуляции. Рационально применять, при необходимости обобщения сложных или шумных наборов данных. Обучение прекращается в соответствии с адаптивной минимизацией веса. Особенности этого способа является долгое обучение и усложненный процесс доучивания.

2. Алгоритм Левенберга-Марквардта заключается в последовательном приближении заданных начальных значений параметров к искомому локальному оптимуму. Алгоритм отличается от метода сопряженных градиентов тем, что использует матрицу Якоби модели, а не градиент вектора параметров. При использовании этого метода обучение автоматически прекращается, как только обобщение перестает улучшаться.

3. Масштабируемый алгоритм сопряженных градиентов - итерационный метод для безусловной оптимизации в многомерном пространстве. Этот метод так же, как алгоритм Левенберга-Марквардта автоматически останавливает обучение при прекращении улучшения, однако он требует меньше памяти, но больше времени.

Для выбора оптимального варианта способа обучения и количества нейронов построим и обучим поочередно всеми тремя способами сеть, содержащую в скрытом слое сначала 10, затем 50 нейронов (табл.2).

Точность аппроксимации оцениваем с помощью коэффициента корреляции (regression R-value) и среднеквадратического отклонения (Mean Squared Error) между получаемыми сетью значениями с целевыми значениями прочности жаростойкого пенобетона.

Коэффициент корреляции  $r$  (1) – это статистическая мера, которая вычисляет силу связи между относительными движениями двух переменных ( $X_i$ ;  $Y_i$ ). Значения коэффициента корреляции находятся в диапазоне от -1,0 до 1,0. Если вычисленное число больше 1,0 или меньше -1,0, то это свидетельствует о наличии погрешности в измерении корреляции. Это объясняется тем, что корреляция -1,0 показывает идеальную отрицательную корреляцию, в то время как корреляция 1,0 показывает идеальную положительную корреляцию. Корреляция 0,0 означает, что нет никакой связи между движением двух переменных. Чем ближе коэффициент корреляции к 1,0, тем лучше качество работы сети и ближе предсказанные нейросетью значения к экспериментальным данным.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$



где  $\bar{X}$  (2),  $\bar{Y}$  (3) – средние значения выборок

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{n} (X_1 + \dots + X_n) \quad (2)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i = \frac{1}{n} (Y_1 + \dots + Y_n) \quad (3)$$

Среднеквадратическое отклонение (СКО)  $S$  (4) - статистическая характеристика распределения случайной величины ( $X_i$ ), показывающая среднюю степень разброса значений величины относительно математического ожидания. Среднеквадратическое отклонение измеряется в единицах самой случайной величины и используется при расчёте стандартной ошибки среднего арифметического, при построении доверительных интервалов, при статистической проверке гипотез, при измерении линейной взаимосвязи между случайными величинами.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

где  $\bar{X}$  – среднее значение выборки (2).

Для получения достоверных результатов данные автоматически случайным образом разделяем на 3 группы:

- Учебный набор данных (Training): Образец данных, используемых для соответствия модели – 70%.
- Набор данных проверки (Validation): Выборка данных, используемая для объективной оценки соответствия модели учебному набору данных при настройке гиперпараметров модели. Оценка становится более предвзятой, поскольку навывк в наборе данных проверки включается в конфигурацию модели – 15%.
- Тестовый набор данных (Test): Выборка данных, используемых для объективной оценки окончательной модели, подходящей для набора данных обучения – 15%.

После чего проводим обучение сети поочередно всеми тремя методами, результаты обучения показаны на рис.5 – рис.7. Из графиков видно, что Алгоритмы Левенберга-Марквардта и сопряженных градиентов заканчивают свое обучение, на 10 и 39 эпохе обучения, когда перестает уменьшаться СКО (MSE). Алгоритм Байесовской регуляции в свою очередь проводит 278 эпох и затрачивает на обучение значительно больше времени и ресурсов, хотя очевидно, что обучение после 38 эпохи не улучшает качество работы сети.

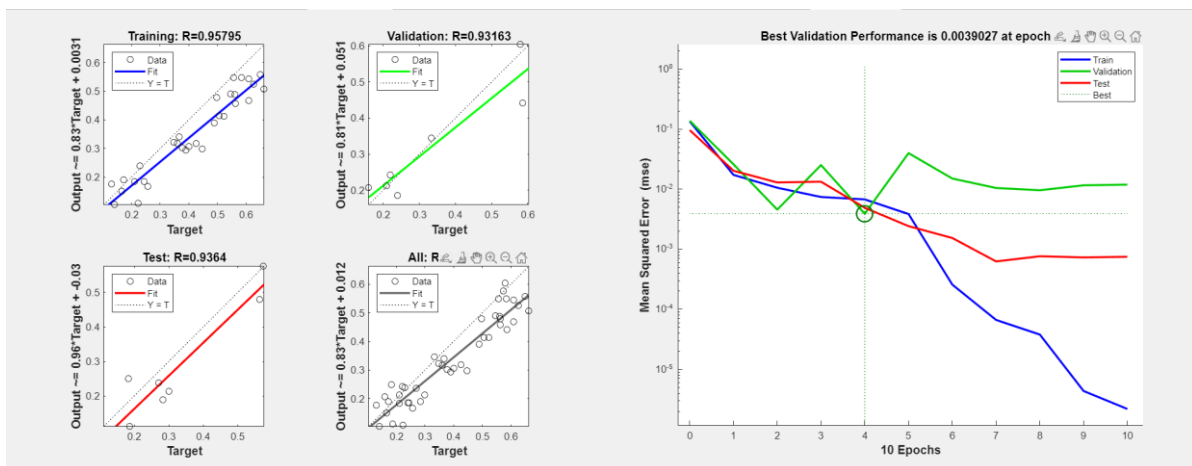
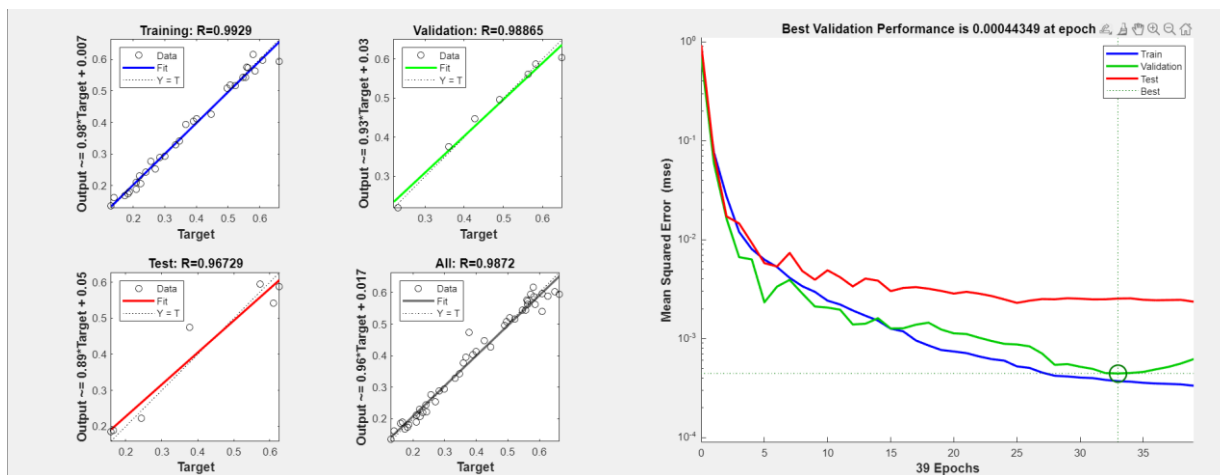
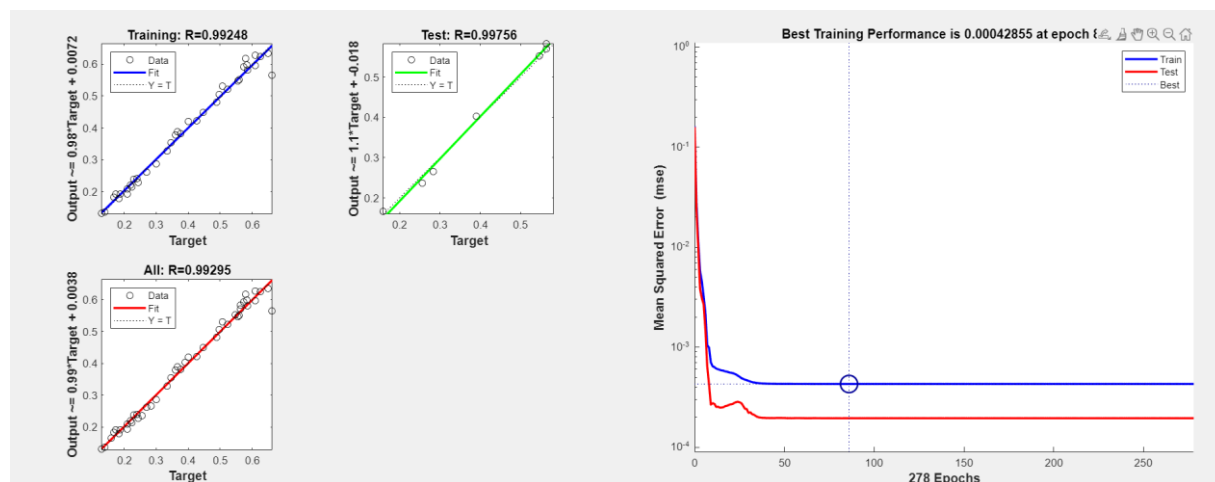


Рис.5. Алгоритм Левенберга-Марквардта (10 нейронов в скрытом слое)

Fig.5. Levenberg-Marquardt algorithm (10 neurons in a hidden layer)



**Рис.6.** Масштабируемый алгоритм сопряженных градиентов (10 нейронов в скрытом слое)  
**Fig.6.** Scalable algorithm of conjugate gradients (10 neurons in a hidden layer)



**Рис.7.** Алгоритм Байесовской регуляции (10 нейронов в скрытом слое)  
**Fig.7.** Bayesian regulation algorithm (10 neurons in a hidden layer)

Аналогично были построены сети, содержащие в скрытом слое 50 нейронов, а результаты вычисления коэффициентов корреляции сведены в табл.2.

Таблица 2. Результаты вычисления коэффициентов вариации  
 Table 2. Results of calculation of coefficients of variation

	Training		Validation		Test		All	
	10	50	10	50	10	50	10	50
Алгоритм Левенберга-Марквардта	0,95795	0,99976	0,93163	0,84674	0,9364	0,81636	0,9423	0,91453
Масштабируемый алгоритм сопряженных градиентов	0,9929	0,9969	0,98865	0,6049	0,9672	0,53549	0,9870	0,80543
Алгоритм Байесовской регуляции	0,99248	0,9992	-	-	0,99756	0,96169	0,99295	0,9919

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведя анализ качества аппроксимации зависимости прочности жаростойкого пенобетона от состава смеси нейронной сетью с одним слоем скрытых нейронов в зависимости от выбранного метода обучения и количества нейронов скрытого слоя, можем сделать вывод, что алгоритм Байесовской регуляции лучше подходит для решения данной задачи с новыми составами, которые отсутствовали в обучающей выборке

и как следствие позволяет с большей точностью масштабировать решение на более широкий диапазон значений, тем самым предсказывать величину прочности жаростойкого пенобетона новых, ранее не испытанных составов. Коэффициент вариации тестовой выборки для сети с 10 нейронами в скрытом слое, обученной по этому алгоритму, после 38 эпохи обучения равен 0,99756, против 0,9364 у алгоритма Левенберга-Марквардта и 0,9672 у алгоритма сопряженных градиентов. Причем точность работы сети незначительно меняется при увеличении числа нейронов скрытого слоя, и мы можем остановиться на сети, содержащей 10 скрытых нейронов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпович М.А. Нейросетевые методы оценки затрат на научно-исследовательские и проектно-изыскательские работы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 1(59). С. 235-240. EDN: SDHBLJ.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660892 Российская Федерация. Программный компонент "Нейросетевые расчеты - построение моделей прогноза осложнений и аварийных ситуаций при бурении и строительстве скважин" (ПКНР): № 2020660182: заявл. 08.09.2020; опубл. 15.09.2020 // Н. А. Еремин, А. Н. Дмитриевский, О. К. Чащина-Семенова [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук.
3. Панкевич О. Д., Штовба С. Д. Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань. Монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ Вінниця, 2005. С. 108.
4. Ротштейн А.П. Медицинская диагностика на нечеткой логике. Вінниця: Континент - ПРИМ, 1996. С. 132.
5. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. - Вінниця: УНІВЕРСУМ - Вінниця, 1999. С. 320.
6. Тонков Ю.Л. Математические модели для идентификации категории технического состояния строительных конструкций на основе нечеткой логики // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 2018. С. 208.
7. Максимова О.М. Разработка и применение нейросетевой технологии прогнозирования к задачам строительной механики и конструкций // Междунар. Конгресс «Наука и инновации в строительстве» SIB. 2008: сб. науч. тр. Воронеж. 2008. С. 146–151.
8. Максимова О.М. Создание и применение нейросетевой технологии для прогнозирования в строительных конструкциях и строительной механике // Фундаментальные и прикладные проблемы науки: сб. науч. тр. I Международного симпозиума. 2010. Т. 2. С. 3–24.
9. Максимова О.М. Развитие и применение нейросетевых технологий для задач механики и строительных конструкций // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 8(79). С. 81-89. EDN RASWYX.
10. Looney C. Pattern Recognition Using Neural Networks: Theory and Algorithms for Engineers and Scientists. Oxford University Press. 1997. P. 458.
11. Cybenko G. V. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function // Mathematics of Control Signals and Systems. 1989. Т. 2, № 4. С. 303-314.

#### ОБ АВТОРАХ

**Дмитрий Владимирович Бородин** – курсант кафедры «Специальные сооружения ракетно-космических комплексов». Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13. E-mail: dmitriy\_working@mail.ru

**Светлана Сергеевна Рябова** – научный сотрудник кафедры «Специальные сооружения ракетно-космических комплексов». Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13. E-mail: sergeeva\_ss@mail.ru

#### ABOUT THE AUTHORS

**Dmitrij V. Borodin** – Cadet of the Department of «Special Structures of Rocket and Spase Complexes». Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky. 197198, Russia, St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13. E-mail: dmitriy\_working@mail.ru

**Svetlana S. Ryabova** – researcher of the department «Special structures of rocket and space complexes». Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky. 197198, Russia, St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13. E-mail: sergeeva\_ss@mail.ru

УДК 539.3

## ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЫСОТНОГО СООРУЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

**Ш.О. Худайназаров**

*Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства,  
г. Ташкент (Узбекистан)*

**Аннотация.** Проведены исследования с целью анализа поведения высотного сооружения на различные кинематические воздействия с учетом нелинейных и вязкоупругих свойства материала. Разработан обобщенный подход для динамического расчета высотных сооружений и построены амплитудно-частотные характеристики сооружений для различных точек сооружения. Исследование динамического поведения высотного сооружения при учете различных по природе нелинейных и диссипативных свойств материала показывает, что совместный учет всех этих свойств приближает получаемую картину к наблюдаемой действительности. Здесь амплитуда колебаний сооружения не бесконечно растет, а с течением времени постепенно снижается и максимально возможный учет нелинейных и диссипативных свойств материала приводит к скорейшему затуханию колебаний.

**Ключевые слова:** расчетная модель, виброизоляция, частота колебаний, амплитуда колебаний, нелинейность, диссипативные свойства материала, амплитудно-частотные характеристики.

**Ссылка для цитирования:** Худайназаров Ш.О. Динамический расчет высотного сооружения с учетом нелинейных вязкоупругих свойств материала при различных кинематических воздействиях // Инженерные исследования. 2022. №5 (10). С. 12-17. EDN: GLDLMF

## DYNAMIC CALCULATION OF A HIGH-RISE STRUCTURE TAKING INTO ACCOUNT NONLINEAR VISCOELASTIC PROPERTIES OF THE MATERIAL UNDER VARIOUS KINEMATIC INFLUENCES

**Sh.O. Khudainazarov**

*Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Tashkent (Uzbekistan)*

**Abstract.** Studies have been carried out to analyze the behavior of a high-rise structure on various kinematic effects, taking into account the nonlinear and viscoelastic properties of the material. A generalized approach has been developed for the dynamic calculation of high-rise structures and the amplitude-frequency characteristics of structures for various points of the structure have been constructed. The study of the dynamic behavior of a high-rise structure, taking into account the non-linear and dissipative properties of the material, which are different in nature, shows that the joint consideration of all these properties brings the resulting picture closer to the observed reality. Here, the vibration amplitude of the structure does not increase infinitely, but gradually decreases with time, and the maximum possible consideration of the nonlinear and dissipative properties of the material leads to the fastest damping of the vibrations.

**Keywords:** calculation model, vibration isolation, oscillation frequency, oscillation amplitude, non-linearity, dissipative properties of the material, amplitude-frequency characteristics.

**For citation:** Khudainazarov Sh.O. Dynamic calculation of a high-rise structure taking into account nonlinear viscoelastic properties of the material under various kinematic influences // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.5 (10). Pp. 12-17. EDN: GLDLMF

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование и строительство высотных сооружений требует обеспечения их надежной эксплуатации при различных динамических воздействиях. Это, в свою очередь, диктует условия ограничения и уменьшения уровня колебаний конструкций от вредного динамического воздействия. К настоящему времени известны различные методы и средства борьбы с недопустимыми колебаниями конструкций, например, изменение жесткостных параметров конструкций, повышение демпфирующих свойств путем использования материалов и конструкций с высокой поглощающей способностью, применение виброизоляции и разнообразных гасителей колебаний.

В практикуемых строительных нормах динамическая расчетная модель осесимметричных сооружений (высотные трубы, градирни и пр.) принимается в виде упругой консоли с распределенной или сосредоточенной массой, что не позволяет учитывать ряд факторов - реальную геометрию, конструктивные особенности, пространственный характер работы сооружения, диссипативные свойства материала сооружения и другие, непосредственно влияющие на искомые значения динамических характеристик и напряженно-деформированное состояние (НДС) сооружений при различных воздействиях. В результате этого найденные значения искомых величин будут заметно отличаться от действительных.

Исследования собственных колебаний высотных осесимметричных сооружений (дымовых труб) показали, что несмотря на имеющиеся различия в характере высших форм колебаний рассматриваемых сооружений, основные (изгибные, продольные и крутильные) формы и соответствующие им частоты собственных колебаний не зависят от размерности выбранной расчетной модели. Поэтому исследования динамического поведения сооружения в неустановившемся режиме с учетом упругого, вязкоупругого и нелинейного деформирования материала можно провести в рамках одномерной модели. Простота расчетной модели позволяет детально изучить влияние различных законов изменения воздействия и различных законов деформирования материала на динамическое поведение сооружений.

Практика современного строительства в сейсмических районах требует исследования динамического поведения конструкций и совершенствования методики их расчета с учетом не только геометрических особенностей конструкций, но также с учетом нелинейных и диссипативных свойств материала сооружения. Практические способы расчета базируются обычно на динамическом анализе сооружений как линейно упругих систем. Однако инструментальные данные и результаты инженерного анализа о характере работы сооружений при сильных землетрясениях указывают на то, что жесткость сооружений не всегда остается постоянной. Поэтому параметры действительной реакции сооружений необходимо определять только с помощью нелинейного анализа, позволяющего разработать более обоснованные методы проектирования и строительства.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В этой статье рассматриваются вынужденные колебания высотных сооружений (рис.1) с кольцевым поперечным сечением  $F(z)$  и кусочнопостоянным наклоном образующих. Материал сооружения обладает нелинейными и диссипативными свойствами.

Здесь представлен общий случай, когда учитываются и нелинейные и вязкоупругие свойства материала. В этом случае используются разработанная нами постановка [4-8] и это не допускает каких-либо упрощений в правой части разрешающей системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений.

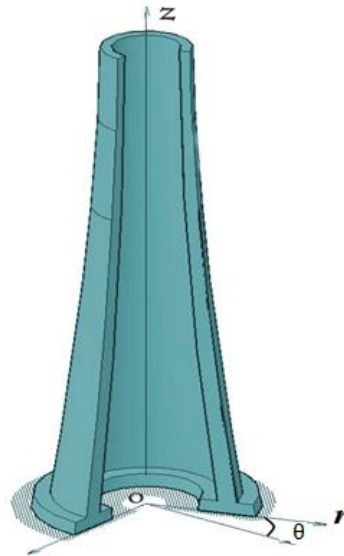
Уравнение имеет вид (1):

$$[M]\{\ddot{w}(t)\}+[K]\{w(t)\}=\{P(t)\}+\int_0^t R_1(t-\tau)[K]\{w\}d\tau+EJ_1\gamma\{V(t)\}-EJ_1\gamma\int_0^t R_2(t-\tau)d\tau\{V(t)\} \quad (1)$$

с однородными начальными условиями:

$$u(z,0)=0, \quad \frac{\partial u(z,0)}{\partial t}=0. \quad (2)$$

Задача заключается в определении перемещений точек сооружения в различные моменты времени. Нелинейная система интегро-дифференциальных уравнений (1) с начальными условиями (2) решается методом Ньюмарка.



**Рис.1.** Модель высотного сооружения  
**Fig.1.** High-rise building model

Уравнение (1) при задаваемых начальных условиях (2) решается методом прямого интегрирования с помощью численной пошаговой процедуры. Нами для решения системы уравнений (1) использовался метод Ньюмарка [9-10], основанный на независимых разложениях  $w(t_i + \tau)$  и ее производной в ряды по степеням  $\tau$ , при удержании членов, содержащих третью производную  $w_i$ . Коэффициенты при остаточных членах  $\alpha$  и  $\beta$  выбираются из условия обеспечения безусловной сходимости процесса интегрирования:

$$w(t_i + \tau) = w_i + \tau \dot{w}_i + \frac{\tau^2}{2} \ddot{w}_i + \alpha \tau^3 \dddot{w}_i$$

$$\dot{w}(t_i + \tau) = \dot{w}_i + \tau \ddot{w}_i + \beta \tau^2 \dddot{w}_i \quad (3)$$

Заменяя  $\ddot{w}_i = \frac{\ddot{w}_{i+1} - \ddot{w}_i}{\tau}$ , запишем выражения для перемещений и скоростей (3) в виде:

$$w_{i+1} = w_i + \tau \dot{w}_i + \frac{\tau^2}{2} \ddot{w}_i + \alpha \tau^3 (\ddot{w}_{i+1} - \ddot{w}_i) \quad (4)$$

$$\dot{w}_{i+1} = \dot{w}_i + \tau \ddot{w}_i + \beta \tau^2 (\ddot{w}_{i+1} - \ddot{w}_i) \quad (5)$$

Тогда полученное из (4) ускорение (6):

$$\ddot{w}_{i+1} = \frac{1}{\alpha \tau^2} (w_{i+1} - w_i) - \frac{1}{\alpha \tau} \dot{w}_i + \left(1 - \frac{1}{2\alpha}\right) \ddot{w}_i \quad (6)$$

подставим в выражение для скорости (5):

$$\dot{w}_{i+1} = \frac{\beta}{\alpha \tau} (w_{i+1} - w_i) + \left(1 - \frac{\beta}{\alpha}\right) \dot{w}_i + \frac{\tau}{2} \left(2 - \frac{\beta}{\alpha}\right) \ddot{w}_i \quad (7)$$

Для отыскания решения  $w_{i+1}$  для момента времени  $t_{i+1}$  общее уравнение движения запишется в следующем виде:

$$[M] \ddot{w}_{i+1} + [C] \dot{w}_{i+1} + [K] w_{i+1} = \{P_{i+1}\} \quad (8)$$

После подстановки в (8) полученных выражений для ускорений (6) и скорости (5), получим алгебраическую систему уравнений:

$$[A] \{w_{i+1}\} = \{R_{i+1}\} \quad (9)$$

где:

$$[A] = [K] + \frac{1}{\alpha \tau^2} [M]$$

$$\{R_{i+1}\} = \{P_{i+1}\} + [M] \left( \frac{1}{\alpha \tau^2} \{w_i\} + \frac{1}{\alpha \tau} \{\dot{w}_i\} + \left( \frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \{\ddot{w}_i\} \right) + \{W_i\}, \quad (10)$$

где:

$$\{W_i\} = \int_0^t R_1(t-\tau)[K]\{w_i\}d\tau + E\gamma\{V_i\} - E\gamma \int_0^t R_2(t-\tau)d\tau \{V_i\} \quad (11)$$

Для решения полученной системы уравнений необходимо задание в начальный момент значений перемещений  $\{w_0\}$ , скорости  $\{\dot{w}_0\}$  и ускорений  $\{\ddot{w}_0\}$ . Обычно принимают  $\{\ddot{w}_0\} = 0$ .

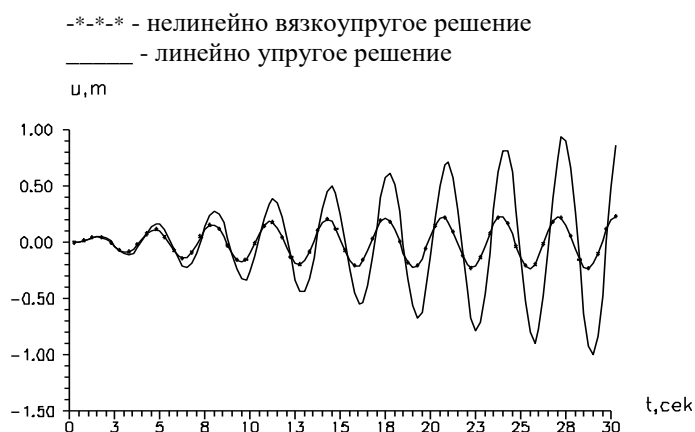
Метод Ньюмарка безусловно устойчив, если  $\beta \geq 0.5$ ,  $\alpha \geq 0.25(\beta + 0.5)^2$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В такой общей постановке с помощью разработанной методики и созданной программы для ЭВМ исследованы задачи в линейной, нелинейной и вязкоупругой постановках. Параметры вязкости  $R_1$  принимаются  $R_2=2R_1$ ;  $\gamma = 120000$ .

### 1. Резонансный режим и синусоидально-затухающее воздействие.

Рассматриваются вынужденные колебания нелинейно-вязко-упругой высотной трубы при кинематическом возбуждении основания по гармоническому закону. Полученные горизонтальные перемещения для точки трубы  $z=325\text{м}$  показаны на рис.2. Этим перемещениям соответствует линия со звездочками. Здесь же для сравнения сплошной линией представлено решение для той же точки линейно упругого сооружения.



**Рис.2.** Вынужденные колебания точки  $z=325\text{м}$  трубы с учетом нелинейно вязкоупругих свойств материала при воздействии  $\ddot{w}_0 = 0.1A\sin(1.68t)$

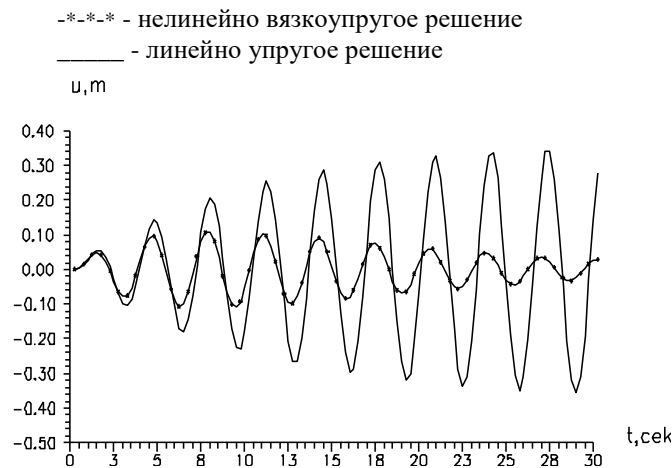
**Fig.2.** Forced vibrations of a point  $z=325\text{m}$  pipes, taking into account the nonlinear viscoelastic properties of the material when exposed to  $\ddot{w}_0 = 0.1A\sin(1.68t)$

Анализ представленных результатов показывает, что общий случай, когда учитываются нелинейные и вязкие свойства материала приводит к наибольшему уменьшению амплитуд перемещений точек высотного сооружения по сравнению со всеми предыдущими вариантами.

### 2. Синусоидально-затухающее воздействие.

Аналогичные результаты получаются при синусоидально-затухающем кинематическом воздействии в основании трубы. Эти результаты представлены на рис.3.





**Рис.3.** Вынужденные колебания точки  $z=325\text{м}$  трубы с учетом нелинейно вязкоупругих свойств материала при воздействии  $\ddot{w}_0=0.1A\sin(1.68t)\exp(-0,1t)$

**Fig.3.** Forced vibrations of a point  $z=325\text{m}$  pipes, taking into account the nonlinear viscoelastic properties of the material when exposed to  $\ddot{w}_0=0.1A\sin(1.68t)$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование динамического поведения высотного сооружения при учете различных по природе нелинейных и диссипативных свойств материала показывает, что совместный учет всех этих свойств приближает получаемую картину к наблюдаемой в действительности. То есть амплитуда колебаний сооружения не бесконечно растет, а с течением времени постепенно снижается, причем максимально возможный учет нелинейных и диссипативных свойств приводит к скорейшему затуханию колебаний.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Динамический расчет зданий и сооружений. Справочник проектировщика / Под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. М.: Стройиздат, 1984. 303 с.
2. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. Справочник проектировщика / Под ред. Б.Г.Коренева, И.М.Рабиновича. М.: Стройиздат, 1981. 215 с.
3. Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций. Справочник проектировщика / Под ред. Б.Г.Коренева, А.Ф.Смирнова. М.: Стройиздат, 1986. 462 с.
4. Мирсаидов М., Хамраев П., Шаалимов А. Экспериментальное и теоретическое определение динамических характеристик дымовой трубы // Строительство и архитектура. Эксп.инф.серия 15. М., 1985. с.17-18.
5. Мирсаидов М., Хамраев П. Экспериментальные исследования колебаний высокой дымовой трубы // Тем. сб. научн. трудов ТашПИ. Экспериментально-теоретические исследования инженерных сооружений. Ташкент, 1985. с.8-15.
6. Mirsaidov M. M., Abdikarimov R.A., Khodzhaev D.A. Dynamics of a Viscoelastic Plate Carrying Concentrated Mass with Account of Physical Nonlinearity of Material: Part 1. Mathematical Model, Solution Method and Computational Algorithm. PNRPU Mechanics Bulletin. 2019. No 2. Pp.143-153. DOI: 10.15593/perm.mech\2019.2.11
7. Abdikarimov R., Khodzhaev D., Vatin N. To Calculation of Rectangular Plates on Periodic Oscillations. MATEC Web of Conferences. Volume 245. 2018. No 010032018 International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering. EECCE 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201824501003
8. Khodzhaev D., Abdikarimov R., Vatin N. Nonlinear oscillations of a viscoelastic cylindrical panel with concentrated masses. MATEC Web of Conferences. Volume 245. 2018. No01001. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering. EECCE 2018. DOI:10.1051/mateconf/201824501001
9. Newmark N.M. Inelastic design of nuclear reactor structures and its implications on design of critical equipment. Seism response anal of nucl power plant syst. Volume k(a), 10p San Francisco, CA, USA; 1977.
10. Sharpe R.L., Newmark N.M. Extending seismic design provisions for buildings to the design of offshore structures. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. Houston, United States. No 140861.1977. Pp. 177-184.
11. De Domenico D., Ricciardi G. Earthquake-resilient design of base isolated buildings with TMD at basement: Application to a case study. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Volume 113, 2018. Pp. 503-521. DOI:10.1016/j.soildyn.2018.06.022
12. Li J.-Y., Zhu S., Shen J. Enhance the damping density of eddy current and electromagnetic dampers. Smart Structures and Systems. Volume 24, Issue 1. 2019. Pp. 15-26. DOI: 10.12989/sss.2019.24.1.015

13. Zhao Z., Zhang R., Jiang Y., Pan C. A tuned liquid inerter system for vibration control. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 164, 2019. No 105171. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2019.105171
14. Gu M., Cao H.L., Quan Y. Experimental study of aerodynamic damping of typical tall buildings *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. No 731572 DOI: 10.1155/2013/731572
15. Gu M., Cao H.L., Quan Y. Experimental study of across-wind aerodynamic damping of super high-rise buildings with aerodynamically modified square cross-sections. *Structural Design of Tall and Special Buildings* Volume 23, Issue 16, 1. 2014. Pp. 1225-1245 DOI:10.1002/tal.1137
16. Mavlanov T, Khudainazarov Sh., Khazratkulov I. Natural Vibrations of Structurally Inhomogeneous Multi-Connected Shell Structures with Viscoelastic Elements. *Journal of Physics: Conference Series* Volume 1425, Issue 1. 2020. No012017 DOI:10.1088/1742-6596/1425/1/012017
17. Mavlanov T and Khudainazarov Sh. Calculation of structural-inhomogeneous multiply connected shell structures with viscoelastic elements *E3S Web of Conferences*. Vol. 97. No 040542. 2019. DOI:10.1051/e3sconf/2019970405418
18. Сергеевцев Е.Ю., Зубков Д.А., Румянцев А.А. Изучение динамических характеристик высотного здания. *Вестник МГСУ*. 2011. №4. С.266-272.

#### ОБ АВТОРАХ

**Шерзод Ачилович Худайназаров** – доцент кафедры «Теоретической и строительной механики», Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства». 100000, Узбекистан, г. Ташкент, ул. К.Ниязова, д. 39. E-mail: scherzodshox77@mail.ru

#### ABOUT THE AUTHORS

**Sherzod Achilovich Khudainazarov** – Associate Professor of the Department of Theoretical and Structural Mechanics, «Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers» National Research University. 100000, Uzbekistan, Tashkent, K.Niyazi st., 39. E-mail: scherzodshox77@mail.ru

УДК 691.537

## УСКОРИТЕЛИ СХВАТЫВАНИЯ И ТВЕРДЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

**Я.А. Олехнович, К. Шукшев**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

**Аннотация.** В современном строительстве часто возникает необходимость в ускорении набора прочности бетонных или железобетонных конструкций, вследствие сжатых сроков строительного процесса или влияния неблагоприятных климатических условий на бетонирование. Строительное материаловедение достигло определенных успехов в создании химических добавок, обеспечивающих сокращение времени схватывания бетонной смеси с сохранением всех требуемых технических показателей. В данной статье проанализированы основные химические компоненты, используемые в бетонах. И ни один из них нельзя назвать «универсальным», потому что у каждого наряду с достоинствами, существуют и недостатки. В статье показано, что нет идеального материала, который мог бы применяться для схватывания бетонной смеси. Перед началом строительных работ, необходимо тщательно изучить особенности, положительные и отрицательные качества каждого материала и выбрать тот, который будет наиболее подходить в данном случае.

**Ключевые слова:** химические добавки, бетонная смесь, бетон, multifunctional добавки, ускорители твердения, ускорители схватывания, отвердитель.

**Ссылка для цитирования:** Олехнович Я.А., Шукшев К. Ускорители схватывания и твердения бетонных смесей // Инженерные исследования. 2022. №5 (10). С. 18-24. EDN: GUNUCV

## ACCELERATORS AND HARDENING OF CONCRETE MIXTURES

**Y.A. Olekhnovich, K. Shukshev**

*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)*

**Abstract.** In modern construction, there is often a need to accelerate the curing of concrete or reinforced concrete structures, due to the short time frame of the construction process or the influence of adverse climatic conditions on concreting. Building materials science has achieved some success in the creation of chemical additives that reduce the setting time of the concrete mix while maintaining all the required technical indicators. This article analyzes the main chemical components used in concrete. And none of them can be called "universal", because each along with advantages, there are also disadvantages. The article shows that there is no ideal material that could be used to set the concrete mixture. Before starting construction work, it is necessary to carefully study the features, positive and negative qualities of each material and choose the one that will be most suitable in this case.

**Keywords:** chemical additives, concrete mixture, concrete, multifunctional additives, hardening accelerators, setting accelerators, hardener.

**For citation:** Olekhnovich Y.A., Shukshev K. Accelerators and hardening of concrete mixtures // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.5 (10). Pp. 18-24. EDN: GUNUCV

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день бетон - один из наиболее долговечных и надежных материалов. Однако его обычные свойства могут не всегда соответствовать условиям строительства или требованиям, предъявляемым к некоторым конструкциям [1]. При необходимости получить необходимые свойства при помощи специальных добавок в бетон применяют различные химические соединения. При помощи них возможно решить такие задачи, как выполнение бетонной работы в условиях отрицательных температур и придание цементу высокой пластичности для повышения прочности готовых конструкций [2].

Различные виды бетонных конструкций должны соответствовать определенным требованиям. Одни способны выдержать огромные нагрузки, другие – не разрушаться при постоянном контакте с водой и т.д. Чтобы придать им нужные свойства, используются добавки для бетона. Их используют в самых разных ситуациях [3]:

1. для возведения многоэтажных зданий;
- 2 для устройства пола, который имеет большую нагрузку, лучше использовать специальные материалы;
3. для изготовления тонких или крупноармированных конструкций;
4. строительство гидротехнических сооружений;
5. изготовление мелких изделий, таких как стеновые и облицовочные блоки; тротуарная плитка с бордюрами;
6. если вы планируете провести работы при отрицательных температурах или в сильный жар, то вам необходимо будет приобрести специальные средства защиты.

## ОСОБЕННОСТИ УСКОРИТЕЛЕЙ СХВАТЫВАНИЯ И ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА

Существует множество присадок, которые могут изменять только одно или два свойства бетона, а также комплексные многофункциональные добавки [4]. Выделяют следующие группы добавок:

- Пластифицирующие - благодаря им бетонный раствор улучшает подвижность и пластичность. Уменьшает риск образования усадочных трещин.
- Ускоритель твердения - это добавка в бетон для прочности и уменьшения времени, необходимого для её набора.
- Водоредуцирующие - позволяет сократить количество воды для приготовления бетонной смеси и обеспечить ее высокую плотность, морозостойкость и прочность.
- Противоморозные – поддерживают в бетонном растворе нормальные реакции, необходимые для твердения, при минусовой температуре.
- Регулирующие подвижность - сохраняют текучесть и пластичность бетона при длительной транспортировке или укладке в жаркую погоду.

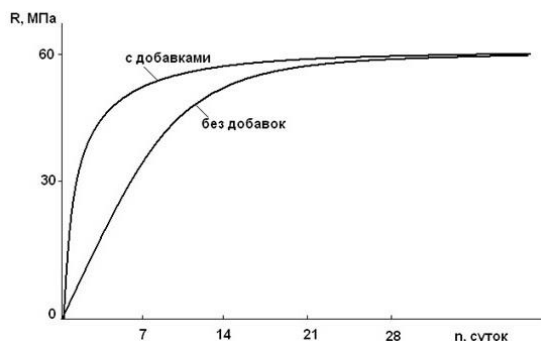
Мы остановимся на добавках, ускоряющих твердение, такая добавка применяется для того чтобы увеличить прочность бетона и уменьшить время, необходимое для его набора. С целью сократить время строительства, часто требуется решение вопроса о том, как повысить прочность бетона не дожидаясь стандартных 28 дней для начала работ [5]. Существует мнение о том, что обычный бетон набирает марочную прочность только за тот период времени, в течение которого его нельзя нагружать [6]. Эти технологические паузы в работе не выгодны никому. В некоторых случаях требуется сократить скорость твердения. Например, при заливке стяжки и фундаментов, монолитных стен и перекрытий или изготовлении тротуарной плитки и шлакоблоков на цементный раствор [7].

Присадки, которые используются в бетоне для прочности - это активация химических реакций гидратации цемента [8]. Это позволяет:

- Повысить первичную (распалубочную) прочность бетона на 20-40%.
- Для увеличения прочности, необходимо повысить его марочную прочность на 10-20%.
- Увеличить подвижность смеси.

Затвердевание ускоряют составы на основе сернокислых, уголекислоты и аммонийных солей, нитратов и хлоридов кальция и натрия. Выбрать подходящую разновидность зависит от типа заливаемой конструкции, в частности – наличия армирования. При минусовой температуре (до -25 °С) нитраты и поташ не вызывают коррозии и подходят для заливки сборно-монолитных элементов из ж/б. Водорастворимые соли в разы снижают сроки схватывания бетона и требуют незамедлительной подачи готовой смеси, так как быстро теряется пластичность [9].

Ускорители твердения оказывают большое влияние на скорость набора прочности бетона на протяжении первых суток затвердевания бетона, со временем их воздействие ослабевает [10]. К 28-суточному состоянию прочность бетона с добавками и без них становится одинаковой, что наглядно прослеживается по графику набора прочности бетона (рис. 1):



**Рис. 1.** График набора прочности образцов<sup>1</sup>  
**Fig. 1.** Graph of curing of specimens

Привлекательные российские марки включают в себя линейки Релакс и Форт, комплексные добавки Универсал П-2 (Асилин-12), Битрон 12-32. Также используются вещества в чистом виде: хлористый кальций, поташ, нитрат калия, сульфаты и алюминаты натрия. Как правило, большинство зарубежных ускорителей относятся к суперпластифицирующим комплексным добавкам для бетона [11].

#### ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ИНОСТРАННЫХ СОСТАВОВ

**Форт УП-2.** Ускоритель твердения, комплексный, позволяющий увеличить прочность на 30-70 процентов в строительных растворах на портландцементе с разной степенью подвижности (увеличивая их до П5). Сухой порошок коричневого цвета на основе натриевых солей вводится после предварительного затворения водой. Расход вяжущего сокращается на 8-12 % и увеличивается конечная прочность изделия на 10% (рис. 2).



**Рис. 2.** Форт УП-2<sup>2</sup>  
**Fig. 2.** FORT UP-2



**Рис. 3.** Релаксатор<sup>2</sup>  
**Fig. 3.** Relaxsator

**Конкрит-Ф.** Состав: хлоридистый кальций, уменьшающий срок затвердевания. Преимущества его применения: повышение стойкости к поверхностному износу (прочность увеличивается в 1,5 раза и выше), минусовым температурам, ускоренное высвобождение заливочных элементов из форм или опалубки. Вводится при затворении сухих компонентов, полностью растворяется в воде. Отлично подходит для производства тротуарной плитки, также практически полностью исключает образование сколов и пустот на изделиях.

<sup>1</sup>Cementim. Всё о бетоне [Электронный ресурс]. – URL: <https://cementim.ru/nabor-prochnosti-betona/?ysclid=lbdmga69w8711364076> (дата обращения: 12.11.2022)

<sup>2</sup>Stroitel Lab [Электронный ресурс]. – URL: <https://stroitel-lab.ru/uskoriteli-sxvatyvaniya-i-tverdeniya-betonnyx-smesej.html?ysclid=lbdmj9kpx77045938> (дата обращения: 12.11.2022)

Реламикс. В линейке продукции компании Полипласт есть 8 марок с разным составом и целевом назначении. На сегодняшний день все виды являются комплексными, поскольку помимо обеспечения высоких показателей прочности на ранних этапах твердения улучшают такие качества бетона: водонепроницаемость и устойчивость к агрессивной среде. Как правило, максимальный эффект от введения достигается при приготовлении растворов высокого класса (от В40 и выше). Отличительные особенности – экономичность в пределах 1% и стандартная дозировка не превышает 1% (рис. 3).

Addiment. Продукция немецкого производителя Sika, признанного лидера по производству строительной химии. В наличии ускорители в виде порошков и готовых смесей, которые используются для разных целей: машинного нанесения (в зимнее время), сокращения сроков схватывания. К достоинствам относится улучшение структуры бетона и повышение его водонепроницаемости, а к недостаткам – высокая цена. Дозировка примерно от 1 до 5% (рис. 4).

Релаксатор. Продается в виде порошка, пасты или водного раствора. Свойства: ускоряет процесс схватывания и набор прочности, также используется как противоморозная добавка. Используется при заливке монолитных конструкций в комбинации с электропрогреваемыми устройствами. В процентном соотношении уменьшает содержание цемента в изделии на 30% (рис. 5).



Рис. 4. Cementol<sup>3</sup>  
Fig. 4. Cementol



Рис. 5. Релаксатор<sup>3</sup>  
Fig. 5. Relaxer

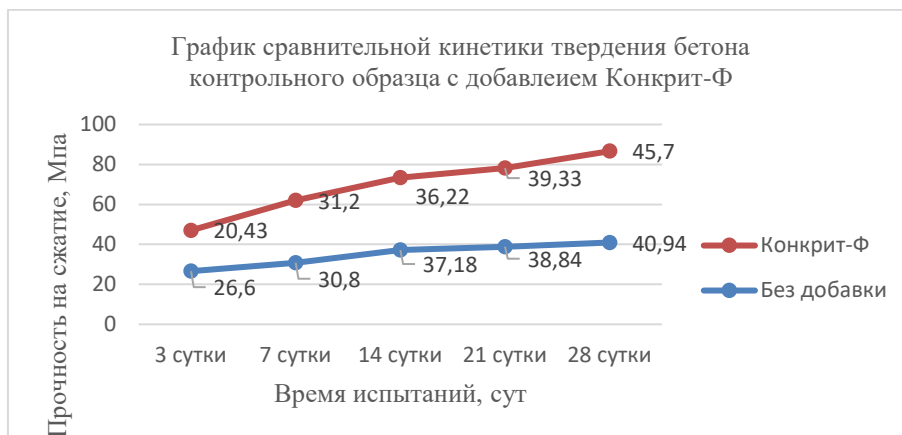
#### ИЗМЕРЕНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НЕРАЗРУШАЮЩИМ КОНТРОЛЕМ СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ



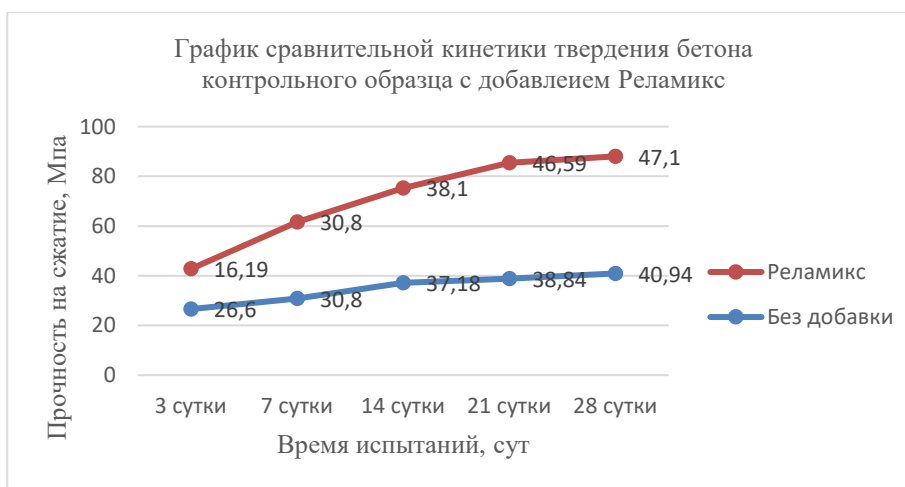
Рис. 6. График сравнительной кинетики твердения бетона контрольного образца с добавлением Форт УП-2  
Fig. 6. Graph of the comparative kinetics of hardening of the concrete of the control sample with the addition of Fort UP-2

<sup>3</sup>Stroitel Lab [Электронный ресурс]. – URL: <https://stroitel-lab.ru/uskoriteli-sxvatyvaniya-i-tverdeniya-betonnyx-smesey.html?ysclid=lbdmj9kpx77045938> (дата обращения: 12.11.2022)





**Рис. 7.** График сравнительной кинетики твердения бетона контрольного образца с добавлением Конкрит-Ф  
**Fig. 7.** Graph of the comparative kinetics of hardening of the concrete of the control sample with the addition of Concrete-F



**Рис. 8.** График сравнительной кинетики твердения бетона контрольного образца с добавлением Реламикс  
**Fig. 8.** Graph of the comparative kinetics of hardening of the concrete of the control sample with the addition of Relamix

Таблица 1. Результаты разрушающего контроля  
 Table 1. Results of destructive testing

Добавка-ускоритель	Метод испытаний	Средняя прочность цементного камня при сжатии, МПа					
		3 сутки	7 сутки	14 сутки	21 сутки	28 сутки	
С добавкой (образцы 3x3x3 см)	Неразрушающий контроль ударно-импульсным методом по ГОСТ 22690-2015	Форт УП-2	16,19	30,8	36,21	46,59	47,1
		Конкрит -Ф	20,43	31,2	36,22	39,33	45,7
		Реламикс	19,41	24,5	30,8	39,29	52,13
Без добавки (образцы 3x3x3 см)	Неразрушающий контроль ударно-импульсным методом по ГОСТ 22690-2015	К	26,6	31,2	36,21	37,84	40,94

### СТОИМОСТЬ УСКОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ БЕТОНА

Каждая из добавок имеет свои функции и особенности. Но важно не только грамотно выбрать нужное средство, но и верно рассчитать необходимое количество. От 0,5 до 15% от общей массы раствора можно добавить в качестве добавки. При этом важно учитывать и тот факт, что в большинстве случаев это 1-3%, но даже одна десятая доля – может сыграть решающую роль. Избыток или чрезмерное содержание вещества в растворах, повлияет на бетон и его характеристики. Изготовление бетона следует доверить специалистам. Тогда у вас есть риск получить конструкцию, которая не имеет нужных свойств. Поэтому вам нужно будет переделать работу. Ниже представлены характеристики ускорителей (рис. 1), опираясь на которые можно подобрать наиболее подходящий ускоритель твердения бетона.



Таблица 2. Характеристики ускорителей  
Table 2. Characteristics of accelerator

№	Наименование, страна-производитель	Типа добавки	Рекомендуемая дозировка, в % от массы цемента	Фасовка, кг	Цена, руб.
1	Форт УП-2, Россия	Комплексная, для ускорения твердения	0,5-0,7	20	1000
2	Конкрит-Ф, Россия	Пластифицирующая, рекомендуемая при изготовлении формовочных изделий	0,5-2	15	2700
3	Релаксор, Россия	Суперпластификатор с противоморозными свойствами	0,5-2,5	25	850
4	Sementrol, Omega P, Словения	Улучшающая водонепроницаемость	1-2,5	50	5350
5	Addiment BE2, Германия	Состав для торкретиванного нанесения смесей	2-4	5	3150

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бетон обладает разнообразными характеристиками в зависимости от качества цемента, дозировки входящих в его состав компонентов, технологии затворения, условий набора прочности. На данные признаки можно влиять используя присадки для бетонной смеси. Введение в раствор количества химических компонентов позволяет сократить производимые работы и заметно увеличить надежность здания из бетона. На основании приведенных результатов испытаний можно заключить, что ускорители схватывания и твердения вызывают резкий подъём тепловыделения и температуры, при этом значительно ускоряют процессы схватывания и твердения. По эффективности действия добавки можно расположить следующим образом: наиболее эффективной является добавка Форт УП-2, на втором месте Реламикс, затем следует Конкрит-Ф. Как видим по таблице самым дорогостоящим считается добавка Sementrol. исходя из таблицы 2, наивысшая цена составляет за ускоритель 5350, с фасовкой в 50 кг и дозировкой в 1-2,5 %, усиливающая водонепроницаемость смеси.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlenko A., Mishakova A., Pertseva O., Olekhovich Y., Averchenko G. Feasibility of using of accelerated test methods for determination of frost-resistance of concrete // E3S Web of Conferences. 2020. №. 157. P. 06035. EDN: WGUVVT
2. Barannikov M. V. A multifunctional additive for heavy concretes // Vestnik MGSU. 2022. №918. P012002.
3. Gamayunova O., Spitsov D. Technical features of the construction of high-rise buildings // E3S Web of Conferences. 2020. No164. P. 08008. EDN: VRCCIF
4. Isik E., Ozdemi M. Consistency of concrete material models that used for RC buildings // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2017. No 4(36). P. 92-105.
5. Перцев В.Т. Свойства цементных систем, модифицированных химическими и минеральными добавками // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2017. № 1. С. 49-52.
6. Тринкер А.Б. Химические добавки для цемента и бетона-достижения и перспективы // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2018. № 2. С. 169-176.
7. Панчина А.А. Высокопрочные бетоны: актуальность использования, способы получения и область применения в современных условиях // XLVI Огарёвские чтения. 2018. С. 28-32.
8. Чивикова Е.В. Применение добавок для бетона // В сборнике: Инновации в строительстве. 2017. С. 165-170.
9. Яковлев Г.И. Высокопрочный бетон с дисперсными добавками // Журнал промышленное и гражданское строительство. 2017. № 2. С. 35-42.
10. Муртазаев С. Ю. Разработка составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов на основе комплексных модификаторов // Устойчивое развитие науки и образования. 2017. № 11. С. 102-108.
11. Пономаренко А.М., Снигирь А.А. К вопросу о монолитном домостроении в современных условиях // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Сборник статей 77-ой всероссийской научно-технической 75 конференции. Под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, Е.А. Ахмедовой. 2020. С. 352-357.

## ОБ АВТОРАХ

**Янис Айгарсович Олехнович** – старший преподаватель. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: [olehnovich\\_yaa@spbstu.ru](mailto:olehnovich_yaa@spbstu.ru)

**Клим Шукшев** – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: [kshukshev@inbox.ru](mailto:kshukshev@inbox.ru)

## ABOUT THE AUTHORS

**Yanis A. Olekhnovich** – Senior Lecturer. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: [olehnovich\\_yaa@spbstu.ru](mailto:olehnovich_yaa@spbstu.ru)

**Klim Shukshev** – Master's student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: [kshukshev@inbox.ru](mailto:kshukshev@inbox.ru)

УДК 699.86

## ВЫБОР ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ АЛЬТЕРНАТИВ

Д.Е. Цыпленков

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

**Аннотация.** Теплоизоляционные материалы имеют различные характеристики и параметры. При выборе оптимального варианта (материала) достаточно сложно учесть все критерии одновременно, особенно когда часть из них стремится к минимуму, например, как стоимость, а другая к максимуму – срок службы. В таких случаях можно использовать метод многокритериальной оценки альтернатив. Для расчетов, представленных в статье, были выбраны наиболее значимые и общие для рассматриваемых теплоизоляционных материалов критерии: коэффициент теплопроводности, срок службы, стоимость, минимальная и максимальная температура применения материала, степень пожарной опасности, плотность, коэффициент сопротивления диффузии водяного пара. Согласно методу многокритериальной оценки альтернатив, материалом с наименьшей суммой (наиболее рациональным решением) оказался аэрогель. Дальнейшие исследования предполагается дополнить теплотехническим расчетом ограждающей стеновой конструкции с использованием аэрогеля, а также оценкой экономической эффективности принятого конструктивного решения.

**Ключевые слова:** теплоизоляционные материалы, энергоэффективность, аэрогель, утеплитель, пластмигран, вакуумная изоляция, PIR-изоляция, жидкая изоляция, многокритериальная оптимизация, принятие решений, критерий, альтернатива, многокритериальный анализ, метод многокритериальной оценки альтернатив.

**Ссылка для цитирования:** Цыпленков Д.Е. Выбор теплоизоляционного материала на основе метода многокритериальной оценки альтернатив // Инженерные исследования. 2022. №5 (10). С. 25-30. EDN: НРҮКЛО

## SELECTION OF THE HEAT-INSULATING MATERIAL ON THE BASIS OF THE METHOD OF MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF ALTERNATIVES

D.E. Tsyplenkov

*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)*

**Abstract.** Thermal insulation materials have different characteristics and parameters. When choosing the best option (material), it is rather difficult to take into account all the criteria at the same time, especially when some of them tend to a minimum, for example, as cost, and the other to a maximum - service life. In such cases, the method of multi-criteria evaluation of alternatives can be used. For the calculations presented in the article, the most significant and common criteria for the thermal insulation materials under consideration were chosen: thermal conductivity coefficient, service life, cost, minimum and maximum temperature of material application, degree of fire hazard, density, water vapor diffusion resistance coefficient. According to the method of multi-criteria assessment of alternatives, the material with the smallest amount (the most rational solution) turned out to be aergel. Further studies are supposed to be supplemented with a thermal calculation of the enclosing wall structure using aergel, as well as an assessment of the economic efficiency of the adopted design solution.

**Keywords:** heat-insulating materials, energy efficiency, aergel, heat insulator, plasticgrain, vacuum insulation, PIR-insulation, liquid insulation, multicriteria optimization, decision making, criterion, alternative, multicriteria analysis, method of multicriteria assessment of alternatives.

**For citation:** Tsyplenkov D.E. Selection of the heat-insulating material on the basis of the method of multi-criteria assessment of alternatives // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.5 (10). Pp. 25-30. EDN: НРҮКЛО

## ВВЕДЕНИЕ

Большая часть энергоресурсов расходуется при эксплуатации здания. Тепловая энергия уходит через различные элементы зданий и сооружений. Поэтому главная задача при повышении энергоэффективности – снизить теплообмен здания с внешней средой [1]. Добиться этого помогает использование энергоэффективных материалов. С каждым годом их число пополняется, так как постоянно ведутся различные испытания, исследования, позволяющие производить инновационные материалы с наилучшими эксплуатационными характеристиками [2, 3]. Использование данных материалов в скором будущем может стать необходимостью, поскольку природные ресурсы ограничены, а цены на них постоянно повышаются. Такие материалы отличаются долговечностью, экологичностью, легкостью, простотой монтажа и так далее. Некоторые материалы при значительно меньшей толщине имеют те же самые показатели энергоэффективности. И поскольку тепла из здания уходит меньше это позволяет при постоянно растущих ценах на коммунальные услуги значительно экономить бюджет [4]. Единственным, но значительным недостатком таких материалов является их высокая цена, которая обосновывается небольшой распространенностью в мире и сложностью изготовления.

## СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

На рынке строительных материалов представлено огромное количество видов теплоизоляционных материалов, позволяющих повысить энергоэффективность зданий и сооружений [5-7]. Традиционными уже давно считаются утеплители на основе минеральной (базальтовой) ваты, пенополистирола и экструдированного пенополистирола. В табл.1 представлены относительно новые виды современных теплоизоляционных материалов [5, 8].

Таблица 1. Современные теплоизоляционные материалы  
Table 1. Modern thermal insulation materials

Материал	Описание	Преимущества	Недостатки
Пластмигран	В основе материала - полистирол и минераловатные гранулы. <i>Область применения:</i> теплоизоляция жилых домов и промышленных сооружений, а также различных инженерных сетей. <i>Коэффициент теплопроводности:</i> 0,08-0,1 Вт/м·К	Безопасен при пожаре, влагоустойчив, хорошие звукоизоляционные свойства, экологически чистый, гибкий, прост и удобен в монтаже, высокая на разрыв прочность, устойчив при воздействии грунтовых вод и микроорганизмов.	Высокая цена. Монтажным работам должны предшествовать работы по обработке поверхности (обезжириванию) для лучшего сцепления с поверхностями.
Вакуумная изоляция	Представляет собой панель из пористого материала (полиуретан, аэрогель и др.), облицованную фольгой, внутри которой создан вакуум. <i>Область применения:</i> утепление жилья (фасады, полы), промышленных зданий, фургонов для перевозки продуктов питания, теплиц и т.д. <i>Коэффициент теплопроводности:</i> 0,004–0,006 Вт/м·К	Высокий срок службы (более 50 лет), безопасность материала при пожаре, экологичность и легкость, низкая плотность молекул, т.е. в нем отсутствует теплопередача, что делает вакуумную теплоизоляцию одним из самых энергоэффективных материалов.	Один из наиболее дорогих и сложных в производстве, сложность монтажа (стыковки панелей), особенно, в труднодоступных местах. При повреждении панели нарушаются ее основные свойства.

Материал	Описание	Преимущества	Недостатки
PIR-изоляция	<p>В основе - пенополиизоцианурат, облицованный фольгированной обшивкой. На 97% материал состоит из пор.</p> <p><i>Область применения:</i> для утепления стен, перекрытий, кровель.</p> <p><i>Коэффициент теплопроводности:</i> <math>\lambda = 0,021</math> Вт/м·К</p>	<p>Влагоустойчив, при горении обугливается внешний слой, образуя углеродную матрицу, которая препятствует дальнейшему распространению огня, срок службы - более 50 лет, легкость (плотность 30-50 кг/м<sup>3</sup>), высокая прочность на сжатие (120 кПа), простота монтажа (за счет профилировки, исключая мостики холода), практически не теряет теплофизические и механические свойства со временем (даже после механических воздействий), не подвержен гниению и разложению, экологичен.</p>	<p>В составе присутствует полиуретан, из которого при нагревании выделяются токсины. Также при температурном воздействии примерно в 200 °С изоляция начинает крошиться и терять прочность, что в некоторых случаях может привести к разрушению теплоизоляции.</p>
Жидкая изоляция	<p>Представляет собой суспензию на основе раствора акриловых полимеров с разреженным газом внутри (технический вакуум).</p> <p><i>Область применения:</i> теплоизоляция стен, полов, кровель, потолков, а также гидроизоляция инженерных систем (трубопроводов).</p> <p><i>Коэффициент теплопроводности:</i> составляет 0,0012 Вт/м·К.</p>	<p>Хорошая адгезия, прочность, водонепроницаемость, стойкость к коррозии, легкость (низкая нагрузка на конструкции), устойчивость к механическим воздействиям и вибрации, герметично изолирует поверхность, экологически безопасен, отсутствие «мостиков холода», негорючесть. Некоторые разновидности данного материала позволяют наносить изоляцию на необработанную поверхность (например, на ржавчину), а также при отрицательных температурах.</p>	<p>Высокая цена.</p>
Аэрогель	<p>Представляет собой желеобразный материал на основе диоксида кремния, жидкая фаза которого заменена газообразной. На 98-99% состоит из обездвиженного воздуха. Плотность аэрогелей всего в 1,5 раза больше, чем у воздуха – может достигать 0,003 г/см<sup>3</sup>. Он является самым легким твердым материалом в мире.</p> <p><i>Область применения:</i> изоляция трубопроводов, легкая промышленность, авиация; теплоизоляция зданий (полы, стены, потолки и др.).</p> <p><i>Коэффициент теплопроводности:</i> 0,01-0,02 Вт/м·К</p>	<p>Низкая теплопроводность, высокая светопропускная способность, что позволяет использовать его в качестве заполнения оконных проемов, гибкость, легкий вес (не утяжеляют конструкций), простота монтажа, высокая огнестойкость (до 1200 °С), водонепроницаемость, гидрофобность, хорошая звукоизоляция, высокая прочность и сопротивление механическим нагрузкам, экологическая безопасность (не содержит опасных веществ), эстетичность.</p>	<p>Высокая цена.</p>

### ОЦЕНКА РАЦИОНАЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЭРОГЕЛЯ МЕТОДОМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ АЛЬТЕРНАТИВ

Теплоизоляционные материалы имеют различные характеристики и параметры. При выборе оптимального варианта достаточно сложно учесть все критерии одновременно, особенно когда часть из них стремится к минимуму, например, как стоимость, а другая к максимуму (срок службы). В таких случаях можно использовать метод многокритериальной оценки альтернатив.

Метод многокритериальной оценки альтернатив – это метод, позволяющий выбрать наиболее эффективное решение, посредством интегральной оценки, принимая во внимание различные критерии, не имеющих прямой зависимости между собой. Классическая модель многокритериальной оценки представлена в [9].

Для выбора теплоизоляционного материала с помощью метода многокритериальной оценки альтернатив сравним аэрогель и шесть других теплоизоляционных материалов. Для начала необходимо выбрать наиболее значимые и общие для всех материалов критерии. Были выбраны: коэффициент теплопроводности, срок службы, стоимость, минимальная и максимальная температуры применения материала, степень пожарной опасности, плотность, коэффициент сопротивления диффузии водяного пара. Числовые значения критериев для рассматриваемых материалов приведены в табл.2.

Для правильной оценки методом многокритериальной оценки альтернатив необходимо также ввести дополнительные варианты – лучший и худший, которые принимаются, как округленное значение суммы наименьшего/наибольшего значения выбранных утеплителей и 10% от их значений.

Таблица 2. Теплоизоляционные материалы и критерии оценки альтернатив  
 Table 2. Thermal insulation materials and criteria for evaluating alternatives

Материал	Коэффициент теплопроводности (при 25 °С), Вт/мК	Стоимость за 1 м <sup>2</sup> , руб.	Срок службы, лет	Максимальная температура применения, °С	Минимальная температура применения (по модулю), °С	Пожарная классификация	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент сопротивления диффузии водяного пара
Худший	0,06	4000	10	800	300	0,5	150	7500
Аэрогель Evergel	0,019	3300	20	675	250	1	1	4,8
Мат из базальтовой ваты Rockwool Техмат	0,037	350	50	640	100	1	43	100
Полиизоциурат (PIR) PirroVentiDuct	0,026	935	30	130	190	1	30	130
Пенополиуретан на основе BASF Elastospray 1622/32	0,026	1250	50	125	125	3	45	100
Экструдированный полистирол Пеноплекс 45	0,034	360	60	75	100	4	40	470
Вспененный каучук K-Flex ST	0,038	2600	25	105	200	1	45	7000
Пеностекло СТЭС D130	0,048	2620	40	430	250	5	130	0
Лучший	0,015	300	80	30	50	6	0,5	0

Далее все показатели критериев необходимо свести к ряду коэффициентов для упрощения дальнейших расчетов по формуле (1):

$$\alpha_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (1)$$

где:  $\alpha_{ij}$  – нормализованные оценки альтернатив по критериям;  
 $x_{ij}$  – оценка  $i$ -ой альтернативы по  $j$ -ому критерию;  
 $x_{min}$  – минимальное значение  $j$ -го критерия по альтернативам;  
 $x_{max}$  – максимальное значение  $j$ -го критерия по каждой альтернативе.

Результаты расчетов сведены в табл.3.

Все критерии стремятся к максимуму или к минимуму. Необходимо свести все коэффициенты к однообразию. Минимизируем их. Для этого, те коэффициенты, критерии которых стремятся к максимуму, необходимо пересчитать. Предположим, что  $\beta \rightarrow \max$ , тогда  $\beta' \rightarrow \min$  и рассчитывается по формуле (2):

$$\beta' = 1 - \beta \rightarrow \min \quad (2)$$

Далее необходимо посчитать сумму по строкам. Так как в нашем случае все критерии минимизировались, то лучшим вариантом будет тот, где сумма наименьшая. Результаты расчетов сведены в табл.4.



Таблица 3. Матрица коэффициентов  
 Table 3. Coefficient matrix

Материал	$\alpha \rightarrow \min$	$\alpha \rightarrow \min$	$\beta \rightarrow \max$	$\beta \rightarrow \max$	$\beta \rightarrow \max$	$\beta \rightarrow \max$	$\alpha \rightarrow \min$	$\alpha \rightarrow \min$
	↘	↘	↗	↗	↗	↗	↘	↘
	Коэффициент теплопроводности (при 25 °С), Вт/мК	Стоимость за 1 м <sup>2</sup> , руб.	Срок службы, лет	Максимальная температура применения, °С	Минимальная температура применения (по модулю), °С	Пожарная классификация	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент сопротивления диффузии водяного пара
Худший	0,055	4000	18	745	275	0,9	145	7700
Аэрогель Evergel	0,100	0,810	0,042	0,897	0,865	0,022	0,001	0,001
Мат из базальтовой ваты Rockwool Техмат	0,550	0,009	0,667	0,846	0,054	0,022	0,292	0,013
Полиизоциурат (PIR) PirroVentiDuct	0,275	0,168	0,250	0,096	0,541	0,022	0,202	0,017
Пенополиуретан на основе BASF Elastospray 1622/32	0,275	0,254	0,667	0,088	0,189	0,457	0,306	0,013
Экструдированный полистирол Пеноплекс 45	0,475	0,012	0,875	0,015	0,054	0,674	0,271	0,061
Вспененный каучук K-Flex ST	0,575	0,620	0,146	0,059	0,595	0,022	0,306	0,909
Пеностекло СТЭС D130	0,825	0,626	0,458	0,537	0,865	0,891	0,896	0,000
Лучший	0,015	315	66	65	90	5,5	0,9	0

Таблица 4. Теплоизоляционные материалы и критерии оценки альтернатив  
 Table 4. Thermal insulation materials and criteria for evaluating alternatives

Материал	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	Σ
	Коэффициент теплопроводности (при 25 °С), Вт/мК	Стоимость за 1 м <sup>2</sup> , руб.	Срок службы, лет	Максимальная температура применения, °С	Минимальная температура применения (по модулю), °С	Пожарная классификация	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент сопротивления диффузии водяного пара	
Худший	0,055	4000	18	745	275	0,9	145	7700	
Аэрогель Evergel	0,100	0,810	0,958	0,103	0,135	0,978	0,001	0,001	3,03
Мат из базальтовой ваты Rockwool Техмат	0,550	0,009	0,333	0,154	0,946	0,978	0,292	0,013	3,26
Полиизоциурат (PIR) PirroVentiDuct	0,275	0,168	0,750	0,904	0,459	0,978	0,202	0,017	3,74
Пенополиуретан на основе BASF Elastospray 1622/32	0,275	0,254	0,333	0,912	0,811	0,543	0,306	0,013	3,43
Экструдированный полистирол Пеноплекс 45	0,475	0,012	0,125	0,985	0,946	0,326	0,271	0,061	3,14
Вспененный каучук K-Flex ST	0,575	0,620	0,854	0,941	0,405	0,978	0,306	0,909	4,68
Пеностекло СТЭС D130	0,825	0,626	0,542	0,463	0,135	0,109	0,896	0,000	3,60
Лучший	0,015	315	66	65	90	5,5	0,9	0	

Согласно методу многокритериальной оценки альтернатив, материалом с наименьшей суммой оказался аэрогель ( $\Sigma = 3,03$ ). Из этого следует, что, если при выборе между данными материалами учитывать все вышеперечисленные критерии, то наиболее рациональным решением будет использование аэрогеля.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы многокритериальной оценки альтернатив используются для задач как с качественными, так и с количественными критериями [10, 11]. Основная проблема методов многокритериальной оценки – это как получить оценки по отдельным критериям и затем объединить их в общую оценку полезности альтернативы. Тем не менее, как показали приведенные выше расчеты, метод многокритериальной оценки альтернатив может успешно применяться, например, для выбора теплоизоляционного материала для ограждающих стеновых конструкций. Согласно методу многокритериальной оценки альтернатив, теплоизоляционным материалом с наименьшей суммой оказался аэрогель ( $\Sigma = 3,03$ ), из чего следует, что, если при выборе между рассматриваемыми материалами (аэрогель, базальтовая вата, полиизоциурат, пенополиуретан, экструдированный полистирол, вспененный каучук, пеностекло) учитывать все вышеперечисленные критерии, то наиболее рациональным решением будет использование аэрогеля.

Дальнейшие исследования предполагается дополнить теплотехническим расчетом ограждающей стеновой конструкции с использованием аэрогеля, а также оценкой экономической эффективности принятого конструктивного решения [12].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильева И.Л., Немова Д.В. Энергоэффективные материалы нового поколения в строительстве // Экология и строительство. 2018. № 4. С. 18-24. DOI 10.24411/2413-8452-2018-10016. EDN YWJGPR.
2. Балакчина О.Л., Никонорова Н.М. Применение аэрогелей в строительстве // Инновационное развитие строительства и архитектуры: взгляд в будущее: Сборник тезисов участников Международного студенческого строительного форума, посвященного 60-летию Академии строительства и архитектуры, Симферополь, 18-20 ноября 2020. Симферополь: ООО «Издательство Типография «Ариал», 2020. С. 140-144. EDN KYDAPR.
3. Гамаюнова О.С. Энергосберегающие решения, направленные на снижение потребления тепловой энергии // Строительство: новые технологии - новое оборудование. 2019. № 9. С. 72-78. EDN QTEVVK.
4. Комарова Н.Д., Есипова А.А., Комарова К.С. Нанотехнологии в строительной отрасли // Университетская наука. 2016. № 1(1). С. 29-31. EDN WAWTFB.
5. Цыпленков Д., Гамаюнова О. Современные строительные энергоэффективные материалы // Строительство: новые технологии - новое оборудование. 2021. № 12. С. 6-11. EDN TKVKWH.
6. Гамаюнова О.С. Методика обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций жилых зданий: специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2021. 166 с. EDN CJHWXK.
7. Гамаюнова О. С. Выбор оптимального варианта утепления жилых домов в различных климатических зонах // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 16(68). С. 89-97. EDN ANXMJJ.
8. Шакирова А., Терех М.Д. Использование аэрогеля в фасадных и светопрозрачных конструкциях // Неделя науки ИСИ: сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 04-10 апреля 2022 года. Том Часть 1. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 184-185. EDN BRYHQZ.
9. Окунева Е.О. Сравнение математических моделей принятия решений в условиях определенности // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Т. 8. № 3(34). С. 65. EDN WIRJHV.
10. Гольдштейн А.Л. Многокритериальная оценка альтернатив // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2012. № 6. С. 18-24. EDN PWNYNR.
11. Родригес В.С., Мокрова Н.В. Многокритериальная оценка альтернатив территориального планирования при строительстве плотин с использованием технологий географических информационных систем // Отходы и ресурсы. 2020. Т. 7. № 1. С. 11. DOI 10.15862/11INOR120. EDN PLBWLf.
12. Terekh M., Tretyakova D., Morozova N., Zemītis J. Cost and Energy Assessment of Buildings Thermal Protection Level // Proceedings of EECSE 2019: Energy, Environmental and Construction Engineering, St. Petersburg, Russia, 19-20 November 2019. Cham: Springer, 2020. P. 191-204. DOI 10.1007/978-3-030-42351-3\_17. EDN VCSMPV.

## ОБ АВТОРАХ

**Даниил Евгеньевич Цыпленков** – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: tsyplenkov.de@edu.spbstu.ru

## ABOUT THE AUTHORS

**Daniil E. Tsyplenkov** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: tsyplenkov.de@edu.spbstu.ru

УДК 693.542.5

## ПУТИ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЗДАНИЙ МО РФ ЗА СЧЕТ УВЕЛИЧЕНИЯ УРОВНЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

**Е.А. Тюрин, М.Ю. Попов, Д.В. Бородин, А.И. Шашков**

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

**Аннотация.** Статья посвящена актуальной проблеме, связанной с процессом эксплуатации зданий и сооружений. Повышение энергетической эффективности играет большую роль в процессе эксплуатации. В виду возрастающих требований к тепловой защите зданий и сооружений, а также износу определенных элементов появляется необходимость реконструкции зданий или их элементов. В соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2030 года одной из задач является повышение энергетической эффективности. В настоящей статье авторами рассмотрен один из способов реконструкции объекта Министерства Обороны Российской Федерации с целью снижения затрат на его эксплуатацию. Основным мероприятием по повышению энергетической эффективности принята замена окон. Проведен анализ существующей по данной теме литературы, учтен заграничный опыт. В статье проанализировано влияние сопротивления теплопередаче окон на характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. Проведено тепловизионное обследование окон. Предложены конкретные пути повышения уровня тепловой защиты ограждающих конструкций. Предложено четыре варианта остекления, а также представлены соответствующие расчеты в соответствии с требованиями действующего законодательства. Приведены примерные сроки окупаемости мероприятий.

**Ключевые слова:** эксплуатация зданий, энергетическая эффективность, ограждающие конструкции, окна, малозатратные мероприятия.

**Ссылка для цитирования:** Тюрин Е.А., Попов М.Ю., Бородин Д.В., Шашков А.И. Пути снижения затрат на эксплуатацию зданий МО РФ за счет увеличения уровня тепловой защиты ограждающих конструкций // Инженерные исследования. 2022. №5 (10). С. 31-36. EDN: LOCTZR

## THE WAYS OF DECREASING THE COST ON THE OPERATION OF BUILDINGS AND OF DEFENSE MINISTRY OF THE RUSSIAN FEDERATION BY INCREASING THE LEVEL OF HEAT DEFENSE OF OUTER CONSTRUCTIONS

**E.A. Turin, M.U. Popov, D.V. Borodin, A.I. Shashkov**

*Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, St.Petersburg (Russian Federation)*

**Abstract.** This article is dedicated to the actual problem, connected with the process of operation of buildings and constructions. The increase of energy efficiency plays a big role in process of operation. Because of the increasing requirements for the thermal protection of buildings and structures, as well as the wear of certain elements, there is a need for reconstruction of buildings or their elements. In accordance with Energy Strategy of Russian Federation for the period up to 2030, one of the tasks is to increase energy efficiency. The article discusses one of the ways to reconstruct the facility of the Ministry of Defense in order to reduce the cost of its operation. There was held the analysis of existing literature dedicated to this theme? The foreign experience was taken into account. In article the influence of resistance to exchange of heat of windows on the characteristics of heat energy consumption on warming and ventilation of the building was analyzed. A thermal imaging examination of windows was carried out. There were suggested exact ways of increase of the level of heat defense of border constructions. Four glazing options were considered, as well as the corresponding calculations were given in accordance with the requirements of current legislation. Approximate payback periods were given.

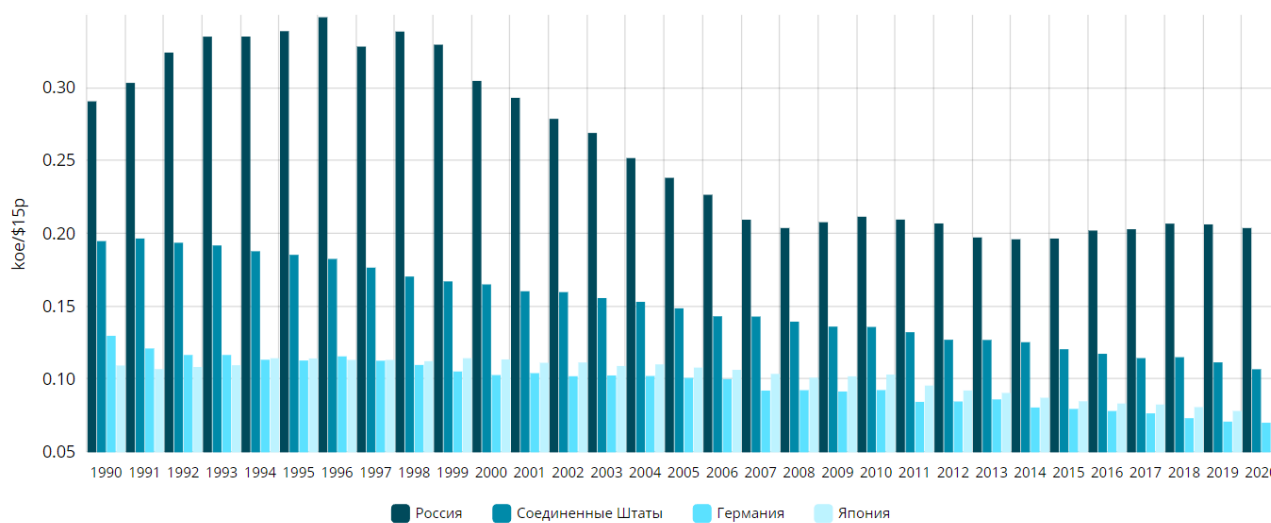
**Keywords:** building maintenance, energy efficiency, walling, windows, low cost interventions.

**For citation:** Turin E.A., Popov M.U., Borodin D.V., Shashkov A.I. The ways of decreasing the cost on the operation of buildings and of Defense Ministry of the Russian Federation by increasing the level of heat defense of outer constructions // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.5 (10). Pp. 31-36. EDN: LOCTZR

## ВВЕДЕНИЕ

В наши дни многие исторические сооружения специального и общевого назначения нуждаются, как минимум, в капитальном ремонте, а зачастую и в полной реконструкции всех ключевых элементов. В последнее время вопрос энергетической эффективности зданий начинает все больше интересовать руководство Вооруженных Сил

Показателем научно-технического и экономического потенциала общества является эффективность использования энергии. Если сопоставить показатели энергоэффективности экономики России с развитыми странами видно, что удельная энергоемкость нашего валового внутреннего продукта (ВВП) в несколько раз выше, чем в развитых странах. Уровень энергопотребления в расчете на единицу сопоставимого ВВП в России выше, чем в США в 1,9 раза, Германии и Японии в 2,9 раза [1]. Все это свидетельствует о значительных резервах экономии энергоресурсов в России. Непростое положение экономики России, в котором оказалась и отечественная энергетика, в ближайшем будущем может привести к глубочайшему энергетическому кризису, который сведет на нет все усилия по реформированию экономики, остановит намечающиеся тенденции в оживлении промышленности.



**Рис.1.** Интенсивность использования энергии на единицу ВВП при постоянном паритете покупательной способности [2]

**Fig.1.** The intensity of energy use per unit of GDP at constant purchasing power parity

Построенные в Северо-Западном регионе России здания имеют высокие показатели расхода тепла в отопительный период: многоквартирные – 350600 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год), многоквартирные – 600800 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год), в то время как в странах с аналогичным климатом, например, Швеции и Финляндии – 135000 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год). Удельное потребление воды из городского водопровода составляет 250 л и более на человека в сутки, а с учетом потребностей хозяйства и промышленности – 500 л, в том числе потребление горячей воды населением при централизованном горячем водоснабжении – 150-200 л в сутки на человека, в то время как в странах Западной Европы – в 3 раза меньше (50-70 л) [2].

Проблема массового строительства энергоэффективных зданий может быть решена только при условии их экономической привлекательности для инвесторов. Однако заинтересованность в дополнительных вливаниях в энергосберегающие мероприятия будет у них лишь в том случае, если с достаточной уверенностью может быть гарантирован возврат инвестиций через небольшой промежуток времени (короткий срок окупаемости) и достаточно привлекательный доход за счет экономии энергии. В связи с чем в приоритете оказываются мероприятия повышения энергоэффективности, не требующие больших капиталовложений, но приводящие к ощутимому сокращению энергопотерь и как следствие сокращению расходов.

## МАЛОЗАТРАТНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

В результате проведенного анализа имеющейся на данный момент литературы и исследований в данной области можно выделить следующие основные энергосберегающие мероприятия (актуальные при реконструкции зданий и сооружений МО РФ) [3]:

- Повышение теплозащиты несветопрозрачных ограждений до оптимального уровня;

- Замена оконных блоков на более энергоэффективные соответствующие современным требованиям;
- Утилизация теплоты вытяжного воздуха;
- Установка автоматических терморегуляторов у отопительных приборов, дающая возможность учесть бытовые тепловыделения, а также теплопоступления от солнечной радиации через окна;
- Оптимизация архитектурно-конструктивных и объемно-планировочных решений;
- Мероприятия по снижению водо- и теплопотребления в системах ГВС;
- Использование нетрадиционных источников энергии.

Отличительными особенностями малозатратных мероприятий являются низкий срок окупаемости и непрерывность рабочего процесса, что особенно важно для объектов Министерства Обороны. Большие потери тепла происходят через светопрозрачные конструкции, поэтому замена окон является одним из основных мероприятий по повышению энергетической эффективности. Так при реконструкции жилого дома в Копенгагене в 1994-1995 гг. специалисты получили следующие результаты: при замене старых окон с сопротивлением теплопередаче  $0,25 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) /Вт}$  на новые с сопротивлением  $0,8 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) /Вт}$  период окупаемости составил 7 лет [1].

### РЕКОНСТРУКЦИЯ УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОГО КОРПУСА

Поскольку основу зданий МО РФ составляют здания постройки 1960-1990 гг. и более ранних лет, одним из ключевых факторов в структуре затрат тепловой энергии зданий МО РФ на отопление являются трансмиссионные потери (потери через ограждающие конструкции) порядка 50-60% для Санкт-Петербурга, основная часть которых приходится именно на потери через светопрозрачные конструкции.

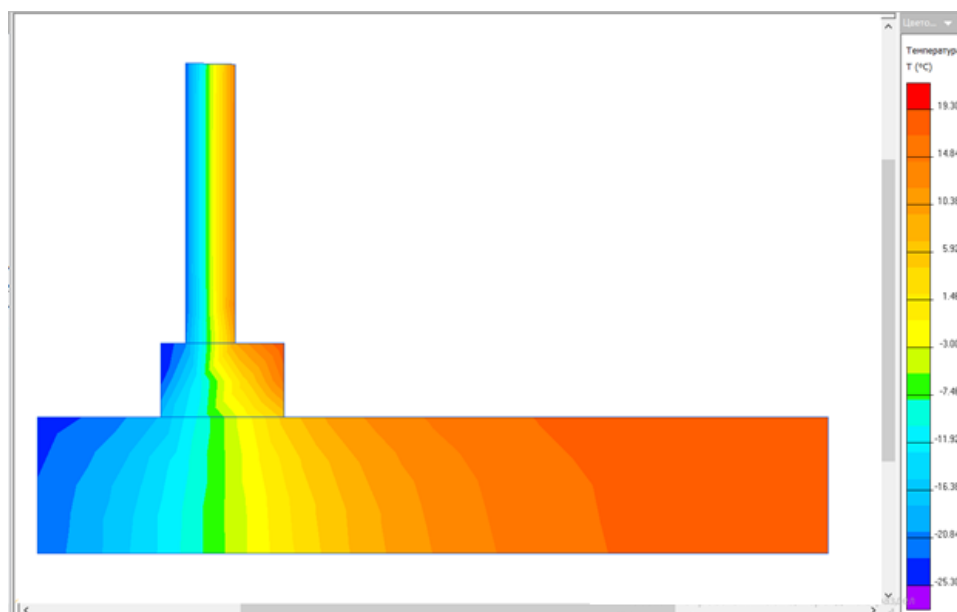
Ярким примером может служить здание учебно-лабораторного корпуса, представленное на рис 2.



**Рис.2.** Здание учебно-лабораторного корпуса

**Fig.2.** The educational and laboratory building

В настоящей работе рассмотрен расчет энергетической эффективности и определение целесообразности проведения энергосберегающих мероприятий для учебного-лабораторного корпуса Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (рис. 2).



**Рис 3.** Узел примыкания деревянного стеклопакета к стене  
**Fig. 3.** The junction of the wooden double-glazed window to the wall

Данные изотермы распределения температуры в материалах, изображенные на рис.3, получены с помощью программного комплекса ELCUT. Таким образом была решена задача стационарной теплопередачи и получены изотермы для сравнительного анализа предложенных вариантов улучшения энергоэффективности здания.

Расчет сопротивлений теплопередачи производится по методике, основанной на технико-экономической оптимизации теплозащитных свойств несветопрозрачных ограждений, исходя из затрат на устройство теплоизоляции и текущей стоимости самих материалов [4-7].

Таблица 1. Технико-экономические показатели сравниваемых вариантов замены оконных блоков  
 Table 1. Technical and economic indicators of the compared options for replacing window blocks

№ п/п	Название стеклопакета	Значение сопротивления теплопередачи $R_{o,окл}^{np}$ , $m^2 \cdot ^\circ C / W$	Средняя цена за квадратный метр	Удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, $W / (m^3 \cdot ^\circ C)$
1	Двойное остекление из обычного стекла в спаренных переплетах	0,4	-	0,228
2	Veka Euroline	0,64	2350	0,206
3	Rehau Blitz	0,69	2640	0,202
4	Rehau Intelio 80	0,95	3580	0,188

Расчетную удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания ( $q_{om}^p$ ),  $W / (m^3 \cdot ^\circ C)$  следует определять по формуле (СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003», формула Г.1)

$$q_{om}^p = k_{об} + k_{вент} - \beta_{КПИ} \cdot (k_{рад} + k_{быт}) \quad (1)$$

где:

$k_{об}$  – удельная теплозащитная характеристика здания,  $W / (m^3 \cdot ^\circ C)$ ;

$k_{вент}$  – удельная вентиляционная характеристика здания,  $W / (m^3 \cdot ^\circ C)$ ;

$\beta_{КПИ}$  – коэффициент полезного использования теплопоступлений;

$k_{рад}$  – удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной радиации,  $W / (m^3 \cdot ^\circ C)$ ;

$k_{быт}$  – удельная характеристика внутренних теплопоступлений здания,  $W / (m^3 \cdot ^\circ C)$ .



В соответствии с Приложением Г СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» для каждого стеклопакета рассчитана удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, что продемонстрировано в табл. 1. На основании этой характеристики сделана оценка ежегодной экономии на отоплении Учебно-лабораторного корпуса. В соответствии с тарифами на отопление при централизованном теплоснабжении для Санкт-Петербурга цена за 1 Гкал во втором полугодии 2022 года составляет 1947,79 руб. Отапливаемый объем Учебно-лабораторного корпуса равен 83758 м<sup>3</sup>. Потребность в тепловой энергии на отопление здания за отопительный период равна 2194 Гкал. На отопление Учебно-лабораторного корпуса в год требуется 4274083 рублей. Таким образом, ежегодная экономия на отопление Учебно-лабораторного корпуса для каждого варианта составляет:

$$\text{Veka Euroline: } 4274083 \cdot \left(1 - \frac{0,206}{0,228}\right) = 412411 \text{ руб.}$$

$$\text{Rehau Blitz: } 4274083 \cdot \left(1 - \frac{0,202}{0,228}\right) = 487395 \text{ руб.}$$

$$\text{Rehau Intelio 80: } 4274083 \cdot \left(1 - \frac{0,188}{0,228}\right) = 749839 \text{ руб.}$$

Площадь остекления Учебно-лабораторного корпуса равна 2662 м<sup>2</sup>. Таким образом, на установку окон системы Veka Euroline требуется 6255700 рублей, системы Rehau Blitz – 7027680 рублей, системы Rehau Intelio – 9529960 рублей. Сроки окупаемости, соответственно, равны 15, 14, 12 лет.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье авторами рассмотрен один из способов реконструкции объекта Министерства Обороны Российской Федерации с целью снижения затрат на его эксплуатацию. Основным мероприятием по повышению энергетической эффективности принята замена окон. Проведен анализ существующей по данной теме литературы, учтен заграничный опыт. В статье проанализировано влияние сопротивления теплопередаче окон на характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. В результате проведенных исследований можно сделать следующий вывод: при замене светопрозрачных ограждений Учебно-лабораторного корпуса Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского значение ежегодной экономии составит до 749 тыс. рублей. Сроки окупаемости таких работ составляют 12-15 лет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания / Москва: АВОК-ПРЕСС. 2003. 200 с. EDN SXQNTF.
2. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Москва: АВОК–ПРЕСС. 2003. 194с. EDN: SXQNSV
3. Иванов Г.С., Дмитриев А.Н., Спиридонов А.В., Хромец Ю.Д. Радикальное решение проблемы энергосбережения в градостроительстве на основе применения новых конструкций окон // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2002. № 10, с.10-12.
4. Васильев Г.П. Результаты натурных исследований теплового режима экспериментального энергоэффективного дома // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2002. № 6(41). С. 3-5. EDN WBТРОВ.
5. Гаврилов-Кремичев Н.Л. Российский оконный рынок: тенденции и особенности развития (продолжение)// Окна и двери. 2006. №6-7. с.2-6.
6. EuroWindow 2002-2008. Der Fenstermarkt in Europa-Russland // Dipl. Betriebswirt. F.Kreimeyer. D-M-D. Essen. 2001.
7. Uzsilaityte L., Martinaitis V. Impact of the implementation of energy saving measures on the life cycle energy consumption of the building // Pap. of conf. of VGTU. 2008. Vol. II. p. 875-881.

#### ОБ АВТОРАХ

**Евгений Анатольевич Тюрин** – к.т.н, доцент. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13. E-mail: evgenii.tyurin@mail.ru

**Михаил Юрьевич Попов** – студент. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13. E-mail: Mikhail\_popov\_2001050105@mail.ru

**Дмитрий Владимирович Бородин** – студент. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13. E-mail: dmitriy\_working@mail.ru

**Алексей Иванович Шашков** – адъюнкт. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13. E-mail: alekseyshashkov@internet.ru

#### ABOUT THE AUTHORS

**Evgenij A. Turin** – Candidate of technical science, Associate Professor. Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky. 197198, Russia, St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13; E-mail: evgenii.tyurin@mail.ru

**Mikhail Yu. Popov** – student. Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. 197198, Russia, St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13. E-mail: Mikhail\_popov\_2001050105@mail.ru

**Dmitrij V. Borodin** – student. Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. 197198, Russia, St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13. E-mail: dmitriy\_working@mail.ru

**Alexey I. Shashkov** – adjunct. Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. 197198, Russia, St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13. E-mail: alekseyshashkov@internet.ru