

в увязке с оценкой состояния водного объекта, куда осуществляется сброс обрабатываемой сточной воды. Данная увязка должна обеспечить применение

технологии, оптимально соответствующей экологическому состоянию водного объекта.

Список литературы

1. Хромов А. В. Динамика использования и качество поверхностных вод Астраханской области / А. В. Хромов // Вестник АГТУ. – 2006. – № 6.
2. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году. – М. : Мин-природы России; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2020.
3. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Астраханской области в 2019 году : государственный доклад. – Астрахань : Управление Роспотребнадзора по Астраханской области, 2020.
4. Функ А. А. Удаление азота из сточной жидкости : автореф. / А. А. Функ. – Новосибирск, 2011.
5. Долина Л. Ф. Очистка сточных вод от биогенных элементов: Монография. Днепропетровск, 2011.
6. Броницын А. Ю. Современные тенденции эколого-ориентированного инновационного развития в сфере очистки сточных вод предприятиями ЖКХ в России и за рубежом / А. Ю. Броницын // Вестник ГУУ. – 2017. – № 7–8.
7. Медведев А. А. Современные проблемы очистки природной воды и пути их решения / А. А. Медведев, Е. В. Пакалова // Перспективы развития строительного комплекса : мат-лы XIV Международной научно-практической конференции. – Астрахань : Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2020.
8. Абуова Г. Б. Экологическое состояние водных объектов в южном регионе России / Г. Б. Абуова, Н. С. Масютин, Е. В. Москвичева // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2018. – № 4 (26).
9. Качалова Г. С. Коагуляционно-сорбционная очистка сточных вод / Г. С. Качалова // Вода и экология: проблемы и решения. – 2019. – №2 (78).
10. Крючихин Е. М. Эффективная очистка городских сточных вод от биогенных элементов на ЦСА Санкт-Петербурга / Е. М. Крючихин, А. Н. Николаев, Н. А. Жильникова, О. Н. Рублевская, Г. А. Панкова, Г. Н. Рафалович // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – № 12.
11. Колова А. Ф. Реагентное удаление фосфатов из сливных вод / А. Ф. Колова, Т. Я. Пазенко, Е. М. Чудинова // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 10 (81).
12. Чудинова Е. М. Удаление фосфатов из сливных вод, образующихся при механическом обезвоживании осадков / Е. М. Чудинова // Молодежь и наука : сб. мат-лов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска. – Красноярск : Сибирский федеральный ун-т, 2013.
13. Wang Sheng. Предварительная очистка городских сточных вод с применением коагулянтов / Wang Sheng, Xu Zu-xin, Qu Ji-ning // Zhongguo jishui paishui = China Water and Wastewater. – 2005. – № 1.
14. Вильсон Е. В. Методологические аспекты физико-химического удаления фосфора из сточных вод на различных этапах очистки / Е. В. Вильсон, Е. Ю. Романенко // Символ науки. – 2015. – № 11–1.
15. Данилович Д. А. Категорирование водных объектов для целей установления технологических показателей НТД / Д. А. Данилович // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2018.

© Е. В. Пакалова, Г. Б. Абуова, Л. А. Шарагин

Ссылка для цитирования:

Пакалова Е. В., Абуова Г. Б., Шарагин Л. А. Реагентный метод удаления фосфатов – как способ улучшения качества очистки сточных вод // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2024. № 1 (47). С. 46–50.

УДК 691

DOI 10.52684/2312-3702-2024-47-1-50-54

СРАВНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОПРОГРЕВА БЕТОНА

С. В. Леонтьев, А. А. Талейко

Леонтьев Степан Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; e-mail: n1306cl@yandex.ru;

Талейко Андрей Алексеевич, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; e-mail: taleyko.99@mail.ru

В статье приводятся результаты сравнения температурных полей, построенных по данным численного моделирования процесса прогрева бетона греющим проводом, и значений температур бетона, полученных в ходе проведения аналогичного натурального эксперимента. Суть эксперимента состояла в прогреве элемента бетонной конструкции с помощью нихромовой проволоки, размещенной в теле бетона. В качестве источника напряжения использовался инверторный сварочный аппарат, напряжение на концах проволоки было постоянным, регулирование прогрева осуществлялось периодическим включением и выключением питания. Измерение температуры бетона в процессе тепловой обработки осуществлялось в центральной и угловой точках конструкции. Полученные в ходе натурального эксперимента температурные данные сравнивались с данными аналогичной модели, построенной в программном комплексе Elcut. По результатам исследований был сделан вывод о схожести результатов, получаемых с помощью модели, и данных натурального эксперимента, а также проанализированы факторы, объясняющие имеющиеся расхождения данных.

Ключевые слова: электропрогрев бетона, моделирование прогрева монолитных железобетонных конструкций, прогрев греющим проводом, EL CUT, зимнее бетонирование, управление электропрогревом бетона.

COMPARISON OF TEMPERATURE FIELDS OF REINFORCED CAST-IN-SITU STRUCTURES CREATED AS A RESULT OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MODELING OF ELECTRIC HEATING

S. V. Leontyev, A. A. Taleyko

Leontyev Stepan Vasilyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Construction Engineering and Materials Science", Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; e-mail: n1306cl@yandex.ru;

Taleyko Andrey Alekseyevich, postgraduate student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; e-mail: taleyko.99@mail.ru

This paper deals with comparison of numerical simulation and experimental temperature data for concrete heated by heating wire. The essence of the experiment was to heat the concrete specimen with nichrome wire embedded in concrete. Inverter welder was used as a source of voltage. The voltage at the ends of the wire was constant. Regulation was carried out by periodical turning on and turning off. Measurement of concrete temperature during heating was taken in central and corner points of the specimen. Temperature data extracted from experiment were compared with data of numerical model created in Elcut. According to the research results, the conclusion about proximity between numerical and experimental data was made, and also the factors of result difference were analyzed.

Keywords: electrical heating of concrete, simulation of concrete heating, heating with heating wire, ELCUT, winter concreting, control of electrical heating of concrete.

Введение

Одним из наиболее распространенных методов термообработки и ухода за бетоном монолитных конструкций в условиях отрицательных температур является метод электропрогрева с помощью греющего провода [1].

Для решения проблемы рационального использования энергоресурсов при прогреве железобетонных конструкций данным методом используются различные системы управления, основу которых составляют специализированные расчетные комплексы, позволяющие моделировать процесс термообработки. Важным при построении температурной модели в таких комплексах является использование достоверных, проверенных данных, с заданной точностью описывающих изменение температуры бетона во всех точках конструкций в зависимости от различных параметров рассматриваемой системы. Таким образом, проведение исследований, направленных на корректировку численных моделей и повышение точности, получаемых с их использованием данных, является актуальной научно-технической задачей.

Имеющиеся на сегодняшний день исследования не рассматривают точность моделирования обогрева бетона с помощью греющего провода [2–4], а также для построения моделей в них используются зарубежные программные комплексы, такие как ANSYS и MIDAS, либо неспециализированный комплекс MathLab.

Цель настоящей работы заключается в оценке адекватности и точности численной модели прогрева бетона, построенной в программном комплексе ELCUT, путем сравнения, полученных с ее использованием данных, с результатами натурального эксперимента.

Анализ литературы по теме проводимых исследований показал, что оценка достоверности и точности численных моделей процесса электропрогрева монолитных железобетонных конструкций, построенных в программном комплексе ELCUT, на сегодняшний день не выполнялась. Исходя из этого, результаты проведения натурального эксперимента, их сопоставление с данными, полученными в ходе анализа численной модели рассматриваемого процесса и выявленные закономерности являются элементами научной новизны данной работы.

Материалы и методы

Для оценки адекватности численной модели прогрева бетона греющим проводом, построенной с использованием отечественного программного комплекса ELCUT, был проведен натуральный эксперимент. Суть эксперимента заключалась в прогреве бетонного массива размерами $395 \times 165 \times 400$ мм с помощью греющего провода и фиксации значений температуры в различных точках бетона рассматриваемого массива.

В качестве греющего провода была использована нихромовая проволока диаметром 0,6 мм (нихромовый нагреватель использовали авторы работы [5]). В качестве источника напряжения был применен инверторный сварочный аппарат САИ-220ПН «Ресанта». При длине нихромовой проволоки, погруженной в бетон – 2,27 м, напряжение на ее концах составило 40 В, Напряжение не менялось на всем протяжении процесса прогрева. Таким образом, активная мощность, выделяющаяся на проволоке, при известном удельном электрическом сопротивлении нихрома $106 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [6] составила 188 Вт. Диаметр и длина проволоки предварительно подбирались из условий получения приемлемой температуры проволоки при доступном источнике питания.

Образец формировался из бетонной смеси тяжелого бетона проектного класса В25, марки по подвижности П4 в опалубке из ДСП. В опалубку был установлен каркас из стеклопластиковой арматуры, на который закреплялась нихромовая проволока (рис. 1). Для предотвращения теплопотерь на верхнюю открытую поверхность бетона был уложен слой минеральной ваты толщиной 50 мм, а снизу форма была установлена на слой экструдированного пенополистирола толщиной 100 мм.



Рис. 1. Каркас внутри формы с закрепленной на нем проволокой (а); общий вид прогреваемого образца (б)

Температура бетона измерялась с помощью цифровых термометров, датчик которых был

погружен в тонкостенную алюминиевую трубку, заполненную машинным маслом. Глубина погружения трубок составила 190 мм от верхней поверхности бетона. Значения температуры с датчиков снимались вручную каждые 30 минут.

Расположение точек, в которых контролировалась температура, представлено на схеме (рис. 2а).

Температура наружного воздуха также измерялась цифровым термометром. Значения температуры наружного воздуха в период проведения эксперимента представлены на рисунке 3.

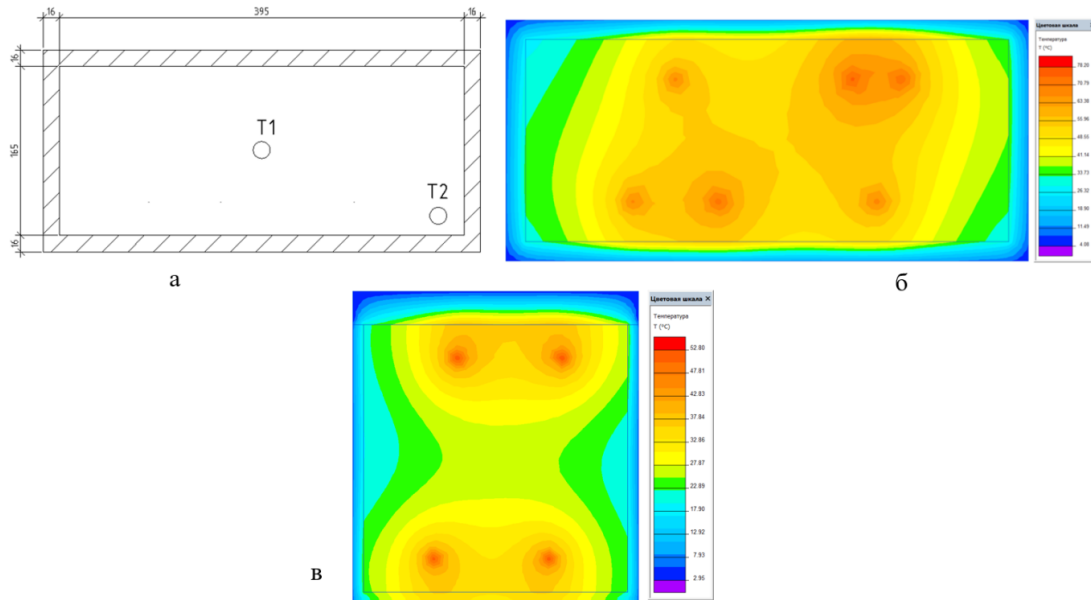


Рис. 2. Схема расположения контрольных точек измерения температуры в бетоне (а) и результаты моделирования температурных полей: картина температурного поля для горизонтально сечения экспериментального образца (б); картина температурного поля для вертикального сечения экспериментального образца, проходящего через точку T1 (в)

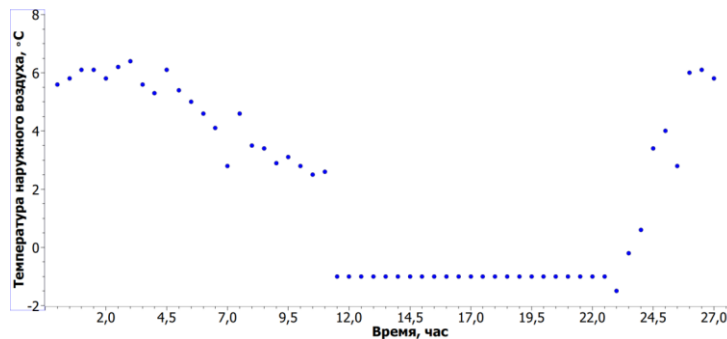


Рис. 3. График изменения температуры наружного воздуха во время проведения эксперимента

В период с 21:00 вечера и до 9:00 утра следующего дня прогрев бетона не осуществлялся. Значения температуры воздуха и бетона не фиксировались. Температура воздуха для построения модели в этот период принималась как средняя по данным Гидрометцентра.

Температура бетона во время прогрева регулировалась с помощью отключения и включения питания, критерием отключения являлось достижение бетоном температуры в центре конструкции 60 °С, а включение осуществлялось, в момент, когда температура бетона в центре достигала 50 °С. Прогрев бетона осуществлялся до достижения им прочности, соответствующей 70 % от проектной. Прочность

контролировалась косвенным неразрушающим методом – поверхностным ультразвуковым прозвучиванием с помощью прибора Пульсар 2М.

Численная модель в программном комплексе ELCUT выполнялась для горизонтального сечения образца (рис. 2б) и строилась для каждого временного промежутка нагрева и остывания бетона. Температура окружающего воздуха принималась как ее среднее значение по экспериментальным данным на заданном временном интервале. Значения параметров, принимаемых при построении численной модели представлены в таблице. Значения теплотехнических характеристик материалов приняты по СП 50.13330.2012.

Таблица

Значения параметров, принимаемые при построении численной модели

Параметр	Ед. изм.	Значение
Длина образца	мм	395
Ширина образца		165
Высота образца		400
Толщина опалубки		16
Теплопроводность материала опалубки	Вт/(К·м)	0,13
Теплопроводность бетона		$1,86+0,0025 \cdot t$ [7]
Плотность материала опалубки	кг/м ³	800
Плотность бетона		2400
Удельная теплоемкость материала опалубки	Дж/(кг·К)	2300
Удельная теплоемкость бетона		840
Мощность источника (нихромовой проволоки)	Вт/м	82

Результаты и обсуждение

Сравнение экспериментальных температурных данных и данных, полученных при построении численной модели для точек T1 и T2,

и разница ΔT между экспериментальными и численными значениями температуры представлены на рисунках 4 и 5.

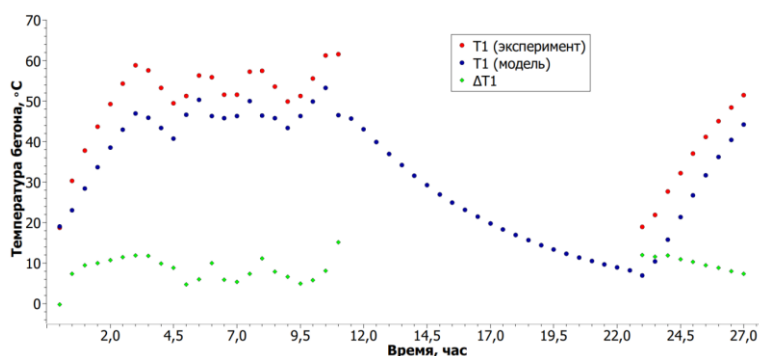


Рис. 4. Экспериментальные и численные значения температуры в точке T1

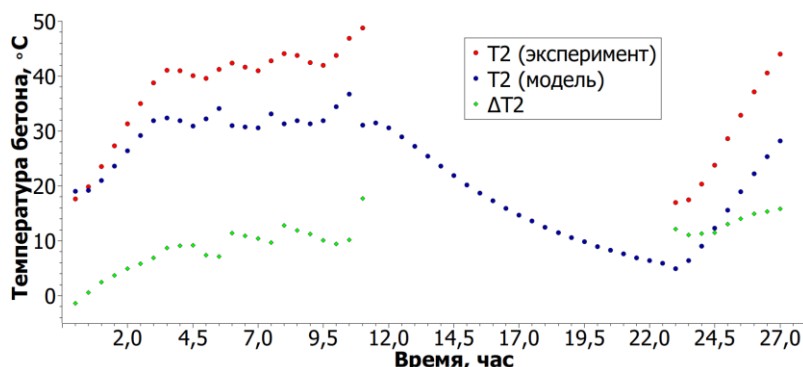


Рис. 5. Экспериментальные и численные значения температуры в точке T2

Анализ данных на рисунках 4 и 5 показывает, что значения температуры бетона, полученные с использованием компьютерной модели, ниже значений, полученных в ходе проведения натурального эксперимента, в среднем на 9 °C для точки T1 и на 3 и 11 °C в период начального продолжительного нагрева и в период поддержания температуры соответственно для точки T2.

К числу факторов, которые могут влиять на точность модельных данных, можно отнести задаваемые при моделировании значения характеристик материалов (в первую очередь бетона) и размерность геометрической модели. Рассмотрим эти факторы отдельно.

При моделировании в ELCUT для материалов задаются такие тепловые параметры как значение теплопроводности, удельной теплоемкости и

плотности материала. Значения всех этих характеристик для бетона не постоянны во времени, что связано с изменением его свойств и структуры в процессе твердения. Также необходимо задавать значения данных характеристик для конкретного состава бетона [8–9]. К недостаткам численного моделирования в ELCUT можно отнести невозможность задания значений теплотехнических характеристик материалов в виде функции от времени. Это возможно сделать только множественным разделением процесса на отдельные подзадачи, что достаточно трудоемко и непрактично.

Программный комплекс ELCUT не позволяет строить трехмерные геометрические модели. Построенная в ходе исследования численная модель рассматривает горизонтальное сечение образца, что не отражает полную картину теплопередачи с

учетом наличия утепления на нижней и верхней горизонтальных поверхностях образца. Поэтому рассмотренное сечение (рис. 2б) является условным, для которого нельзя осуществить точную привязку значений температур, полученных из модели, к аналогичным данным, полученным в ходе натурного эксперимента в разных точках образца. С другой стороны, если рассмотреть модель прогрева образца в виде его вертикального сечения, проходящего через точку T1 (рис. 2в), то в этом случае не будет учитываться наличие вертикальных участков провода, и значения температуры в центре образца по модельным данным еще больше будут различаться с экспериментальными.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод о том, что расхождение между экспериментальными и

модельными температурными данными присутствуют, и они вызваны в первую очередь тем, что при построении модели в виде двумерного сечения не учитывается значительная для небольших размеров образца часть греющего провода. Поэтому в будущем может потребоваться экспериментальная проверка численных моделей на примере реальных строительных конструкций, для которых из-за значительных размеров пренебрежение частью провода при построении характерного сечения конструкции не будет сказываться на температурных данных.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Звереву Олегу Михайловичу, к. т. н, доценту кафедры общей физики ПНИПУ за помощь в организации эксперимента.

Список литературы

1. Гнам П. А. Технологии зимнего бетонирования в России / П. А. Гнам, Р. К. Кивихарью // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 9 (48). – С. 7–25.
2. Tuo Shi. Temperature Field of Concrete Cured in Winter Conditions Using Thermal Control Measures / Tuo Shi, Chunlin Deng, Jiaqi Zhao, Pingxiang Ding, Zhihong Fan // Advances in Materials Science and Engineering. – 2022. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/7255601>.
3. Yong Zeng. Study on early-age thermal field of single-cell box girder concrete cured with electric heating furnaces / Yong Zeng, Yutong Zeng, Dong Jiang, Shanhong Liu // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2022. – № 147. – P. 2701–2714. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10565-0>.
4. Дербасова Е. М. Исследование температурных режимов ускоренного твердения монолитных конструкций, возводимых в условиях отрицательных температур / Е. М. Дербасова, Е. М. Бялецкая, М. В. Вереин, Р. М. Дуафи // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 2 (32). – С. 21–27.
5. Шихирева Ю. В., Оборский Г. А., Савельева О. С. Особенности проектирования и управления процессами нагрева твердеющего железобетона внутренними источниками тепла / Ю. В. Шихирева, Г. А. Оборский, О. С. Савельева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 2, № 5 (68). – С. 20–24.
6. Физические величины : справ. / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; под ред. : И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
7. Дворкин Л. И. Испытания бетонов и растворов. Проектирование их составов / Л. И. Дворкин, В. И. Гоц, О. Л. Дворкин. – М. : Инфра-Инженерия, 2014. – 432 с.
8. Нияковский А. М. Разработка математической модели процесса твердения бетона на основе трехмерного уравнения теплопроводности / А. М. Нияковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 16. – С. 72–79.
9. Shahriar Abubakri. Electric curing parameters of mortar and its mechanical properties in cold weather / Shahriar Abubakri, P. S. Mangat, Vincenzo Starinieri, Gilson R. Lomboy // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 314, part A. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125615>.

© С. В. Леонтьев, А. А. Талейко

Ссылка для цитирования:

Леонтьев С. В., Талейко А. А. Сравнение температурных полей монолитных железобетонных конструкций, получаемых в результате экспериментального и численного моделирования процесса электропрогрева бетона // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2024. № 1 (47). С. 50–54.

УДК 69.05

DOI 10.52684/2312-3702-2024-47-1-54-58

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ РЕСУРСОВ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

С. Х. Байрамуков, З. Н. Долаева

Байрамуков Салис Хамидович, доктор технических наук, профессор кафедры строительства и управления недвижимостью, Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск, Российская Федерация, тел.: + 7 (8782) 29-35-51; e-mail: salis_pochta@mail.ru;

Долаева Зурьят Ньюжуровна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и управления недвижимостью, Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск, Российская Федерация, тел.: + 7 (8782) 29-35-51; e-mail: dolaeva.zu@mail.ru

В современном мире оптимальное планирование строительного производства является актуальной практической и научной задачей. Достаточно сложно наладить ресурсный баланс, требуется оперативно регулировать пространственно-