УДК: 691 DOI: 10.53816/23061456_2022_9–10_127

ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

THERMAL PROTECTION STRUCTURES BASED ON LOW-DENSITY NON-AUTOCLAVED FOAM CONCRETE FOR CONSTRUCTION IN THE ARCTIC REGION

Канд. техн. наук А.М. Шевчук, д-р техн. наук А.М. Сычева,
д-р техн. наук С.В. Косарев, А.И. Шашков, Д.В. Черевань

Ph.D. A.M. Shevchuk, D.Sc. A.M. Sycheva, D.Sc. S.V. Kosarev, A.I. Shashkov, D.V. Cherevan

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В работе представлены результаты исследований по разработке неавтоклавного пенобетона пониженной плотности (D150) для строительства зданий и сооружений в климатических условиях Арктического региона России. Рассмотрен механизм действия танинов и альгинатов на стабилизацию строительной пены и снижение коэффициента теплопроводности пенобетона. Предложена теплозащитная конструкция с несъемной опалубкой. Показано, что толщина конструкции снижается на 30 % при использовании пенобетона низкой плотности. Для оценивания эффективности разработанного неавтоклавного пенобетона пониженной плотности предложена методика формирования ракурсных прогнозных изображений зданий и сооружений (в инфракрасном диапазоне) с учетом особенностей района строительства и местности вблизи них в условиях Арктического региона.
Ключевые слова: строительство в Арктике, теплозащитные материалы, дистанционное зондирование земли, объект строительства.

The paper presents the results of research on the development of low-density non-autoclaved foam concrete (D150) for the construction of buildings and structures in the climatic conditions of the Arctic region of Russia. The mechanism of action of tannins and alginates on the stabilization of construction foam and the reduction of the thermal conductivity coefficient of foam concrete is considered. A heat-shielding structure with fixed formwork is proposed. It is shown that the thickness of the structure is reduced by 30 % when using low density foam concrete. To evaluate the effectiveness of the developed low-density non-autoclaved foam concrete, a method for generating perspective predictive images of buildings and structures (in the infrared range) is proposed, taking into account the characteristics of the construction area and the area near them in the conditions of the Arctic region.
Keywords: construction in the Arctic, heat-protective materials, remote sensing of the earth, construction object.

Введение

Экстремальные климатические условия Заполярья — полярная ночь и полярный день (длительностью до полугода), низкие температуры воздуха и ледяные грунты накладывают значительные ограничения на строительство в этом регионе. Эти условия связаны с особенным географическим положением этого региона: в северных широтах угол падения солнечных лучей низок, и их энергия распределяется на весьма большую территорию [1].

Тем не менее стратегическое развитие России требует все в большей мере освоения Заполярья и, в частности, Арктики, а значит и строительства зданий и сооружений для комфортного проживания людей и ведения хозяйственной и иной деятельности.

Кроме того, в целях обеспечения строительства в российской Арктике Минстрой России инициировал разработку новых средств поражения (СП) и ГОСТ для строительства объектов за полярным кругом. При этом базой для новых норм станут научные исследования [2]. Вместе с тем разработка инновационных материалов для Арктического региона с необходимыми характеристиками подразумевает оценивание их эффективности, что связано на практике с определенными трудностями, а поэтому требует и нетрадиционных подходов.

Синтез неавтоклавного пенобетона

Основная задача синтеза новых высокоэффективных материалов для северного строительства и конструкций на его основе может быть решена путем создания пенобетона низкой плотности с пониженным коэффициентом теплопроводности, а также использованием конструкций с несъемной опалубкой, в которую можно уложить такой материал и повысить тем самым ее теплозащитные свойства.

Преимуществами таких конструкций являются:

– снижение толщины ограждающей конструкции;

– экономия ресурсов при строительстве зданий и сооружений;

– снижение теплопотерь;

– снижение нагрузки на фундамент;

– повышение энергоэффективности зданий и сооружений.

При синтезе пенобетона низкой плотности (D100…150) важным будет несколько аспектов.

1. Получение устойчивой пены, которая обеспечит сохранение низкой плотности материала.

2. Вопросы твердения пенобетона с сохранением его пористой структуры при пониженных и отрицательных температурах, характерных для Арктического региона.

Устойчивость строительной пены зависит от многих факторов, одним из которых является устойчивая структура пенной пленки, определяющая время жизни пены.

В случае получения пенобетона низких плотностей нужны высокоустойчивые пены, поскольку они занимают основной объем материала и определяют его свойства. Для повышения устойчивости пены используют стабилизаторы, механизм действия которых связан с замедлением истечения жидкости из пенной пленки под действием силы тяжести.

Этот процесс можно замедлить, если ввести в пену вещества, повышающие вязкость межпленочной жидкости, или образующие с компонентами пенообразователя прочные связи [3].

В работе предлагается получение пенобетона плотности D150 на основе белкового пенообразователя FoamCem, портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н, суперпластификатора «МС-ТехниФлоу 80» и заполнителя — доломитезированного известняка.

В качестве стабилизаторов в работе предложено исследовать танины (от франц. tanner — дубить кожу). Танины это группа фенольных соединений растительного происхождения, содержащих большое количество групп OH. Танины способны образовывать с белковыми молекулами пенообразователя очень прочные химические соединения. Такие связи должны препятствовать истеканию жидкости из пенной пленки и повышать ее устойчивость [4].

Кроме танинов, в работе предложено опробовать альгинаты. Альгиновая кислота $(C_6H_8O_6)n$ — полисахарид, вязкое резиноподобное вещество, извлекаемое из красных, бурых и некоторых зелёных водорослей. При введении альгината в состав раствора пенообразователя предполагается повышение устойчивости пены в результате реализации другого

Таблица 1

Расход сырьевых материалов на 1 м³ пенобетона

Портландцемент, кг	Доломитезированный известняк, кг	В/Т	Пенообразователь, л	Стабилизатор, г
120	20	0,55	2,52	8,7

механизма — повышения вязкости межпленочной жидкости.

Предварительные эксперименты показали, что устойчивость пены при использовании танинов увеличивается на 40 %, а при использовании альгинатов на 70 %. При производстве пенобетона в работе использовался альгинат, как наиболее эффективный.

В табл. 1 показан состав пенобетона средней плотности D150.

Коэффициент теплопроводности пенобетона в возрасте 28 суток нормального твердения в сухом состоянии составил 0,035 Вт/ (м·°С).

Важной особенностью, позволяющей сохранить теплозащитные свойства пенобетона, является его твердение при пониженных и отрицательных температурах в северных регионах. Согласно Хитрову А.В. [5] существует три способа ускоренного твердения монолитного пенобетона при пониженных и отрицательных температурах с использованием известных пенообразователей:

– метод «термоса» с предварительным подогревом пенобетонной смеси;

– электропрогрев греющими проводами и с применением противоморозных добавок.

Эти методы позволяют укладывать пенобетон с его последующим твердением до минус 15 °С. При этом известно, что собственное тепло экзотермической реакции, выделяющееся при твердении цемента, и пористая структура пенобетона, удерживающая это тепло в объеме материала, позволяют укладывать пенобетон при пониженных положительных и небольших (до минус ~5 °С) отрицательных температурах. В такие климатические периоды рекомендуется укладывать пенобетон в ограждающую конструкцию.

Пример ограждающей конструкции с несъемной опалубкой, в которую заливается неавтоклавный пенобетон пониженной плотности, представлен на рис. 1 [6].

Далее в работе показаны результаты теплотехнического расчета толщины ограждающей конструкции.

Цель теплотехнического расчета — определение толщины ограждающей конструкции и минимальной толщины слоя теплоизоляционного пенобетона ограждающей стены.

Теплотехнический расчет выполнен в соответствии с нормами тепловой защиты [7, 8] и с учетом климатических условий для Арктического региона [9].

Расчет выполнен для двух вариантов ограждающих конструкций.

Вариант 1:

– кирпич декоративный толщиной 120 мм;

– утеплитель (минеральная вата);

– силикатный кирпич толщиной 250 мм.

Вариант 2:

– кирпич декоративный толщиной 120 мм;

– неавтоклавный пенобетон низкой плотности (D100...150);

– силикатный кирпич толщиной 250 мм.

Значения характеристик материалов показаны в табл. 2.

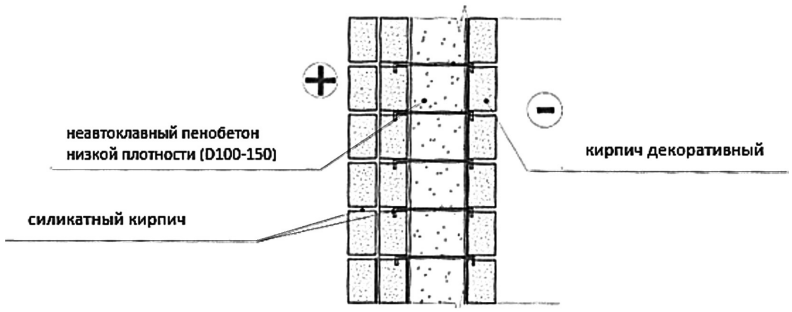

Рис. 1. Ограждающая конструкция с несъемной опалубкой

Таблица 2

Значения характеристик материалов

№ слоя	Материал слоя	Толщина слоя, мм	Коэффициент теплопроводности, Вт/м
1	Кирпич декоративный	120	0,96
2	Утеплитель (минеральная вата)	×	0,085
2*	Неавтоклавный пенобетон низкой плотности (D150)	×	0,035
3	Силикатный кирпич	250	0,87

2* — слой для конструкции стены второго варианта

В соответствии с расчетом толщина слоя утеплителя составила:

– утеплитель конструкции стены для первого варианта (минеральная вата):

$$\delta_2 = 0,085 \cdot 4,558 = 387 \text{ мм};$$

– неавтоклавный пенобетон низкой плотности (D150) для второго варианта:

$$\delta_{2^*} = 0,035 \cdot 4,558 = 159 \text{ мм}.$$

По результатам теплотехнического расчета можно сделать вывод, что при использовании неавтоклавного пенобетона низкой плотности (D100...150) толщина теплоизоляционного слоя уменьшится более чем на 50 %, а ограждающей конструкции в целом на 30 %.

Методика априорного прогнозирования эффективности применения неавтоклавного пенобетона пониженных плотностей в арктическом строительстве

Разработка новых материалов, таких как неавтоклавные пенобетоны пониженной плотности (D150), подразумевает оценивание их эффективности для разных условий эксплуатации. Для Арктического региона на практике это связано с определенными трудностями, а поэтому требует и нетрадиционных подходов, одним из которых является метод дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) с помощью съемочного оборудования (радиометров, радаров, анализаторов, тепловизоров и др.), расположенных на аэрокосмических носителях [10]. Однако в настоящее время широкому применению гиперспектральных изображений для аэрокосмических исследований препятствует отсутствие достаточного количества спутников и воздушных носителей, оборудованных гиперспектрометрами с требуемым пространственным разрешением сканирующих устройств (менее 0,5 м), а также сложности, связанные с обработкой и интерпретацией больших потоков информации, формируемой этими приборами [11].

В связи с этим для априорного проведения мониторинга в работе предлагается разработка методики формирования ракурсных прогнозных изображений зданий и сооружений с учетом особенностей района строительства и местности вблизи них (в инфракрасном диапазоне) при различных внешних условиях (например, арктических).

Общий алгоритм работы предлагаемой методики следующий:

– формирование начальных условий, влияющих на особенности теплообмена;

– создание трехмерной твердотельной текстурированной модели (CAD-геометрии) строительного объекта (СО), выбор типа конечного элемента и генерация расчетных сеток;

– проведение теплового (теплотехнического) расчета и получение температурных полей по поверхностям строительного объекта и областей рядом с ними;

– формирование ИК-изображений строительного объекта и областей рядом с ними на основе полученных температурных полей;

– верификация полученных ИК-изображений с гиперспектральными снимками, полученными с помощью аэрокосмических средств (рис. 2).

Далее дадим некоторые пояснения к предложенной методике.

Начальными условиями, влияющими на распределение температур на исследуемом участке местности, являются следующие основные факторы:

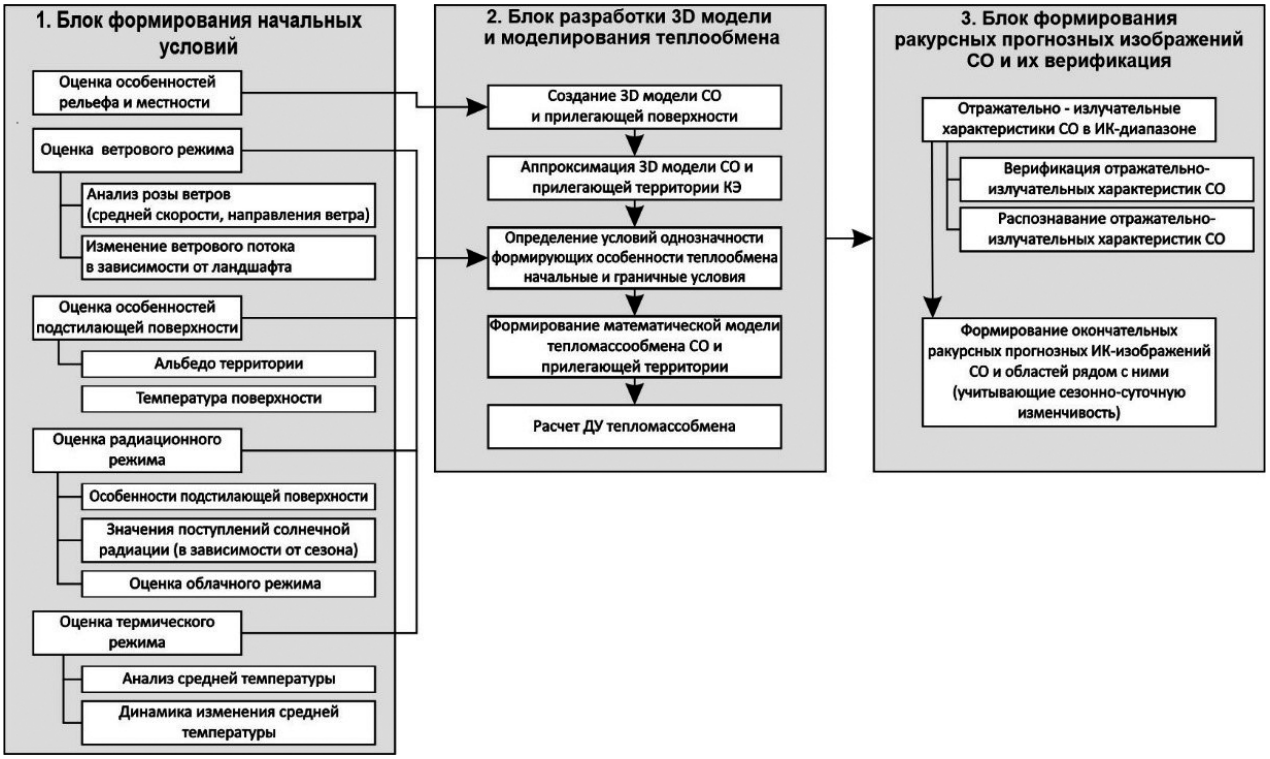

Рис. 2. Блок-схема методики формирования ракурсных прогнозных изображений СО с учетом особенностей района строительства и местности вблизи них

– особенности рельефа и местности;

– ветровой режим местности;

– особенности подстилающей поверхности (местности);

– радиационный режим;

– термический режим.

Основная задача этапа оценки особенностей рельефа производится с целью определения матрицы высот вблизи СО. Определяются ровные места и относительные понижения рельефа, плоские водоразделы и вершины, склоны различной крутизны [12].

В качестве показателей перемещения воздушных потоков вне зданий и сооружений используется средняя скорость ветра с поправками на антропогенный и естественный ландшафты. Скорость ветра и направление (северное, западное, южное и восточное) при формировании ракурсных прогнозных изображений строительного объекта и поверхности вблизи него определяется согласно [13, 14].

Оценка подстилающий поверхности включает в себя [15–17]:

– определение фактических данных о величине альбедо территории;

– определение динамики изменения альбедо территории;

– определение температуры поверхности с учетом данных об альбедо территории;

– определение динамики распределения температуры поверхности с учетом данных об альбедо территории.

Оценка радиационного режима заключается в следующем. Приход солнечной радиации зависит от астрономических факторов, прозрачности атмосферы для солнечной радиации и облачности. Расход солнечной радиации зависит от отражательных свойств поверхности (альбедо). Эффективное излучение определяется температурой подстилающей поверхности, стратификацией атмосферы, облачностью и общим влагосодержанием атмосферы [18].

Для создания ракурсных прогнозных изображений строительного объекта и поверхности вблизи них необходимо построение адекватной трехмерной модели.

CAD-геометрия строительного объекта проводится с использованием программного обеспечения создания твердотельных моделей (в масштабе 1:1). Трехмерная модель заданного объекта

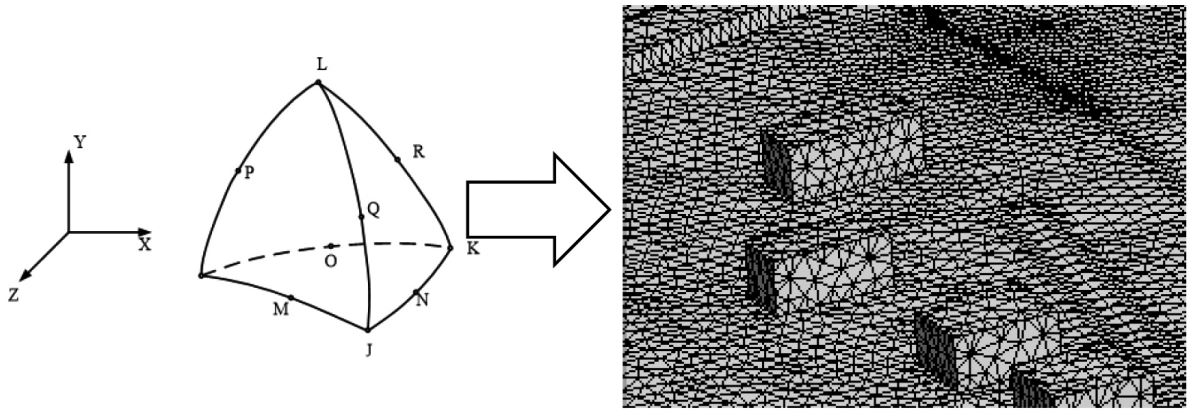

Рис. 3. Форма применяемого в расчетах конечного элемента и результат моделирования объекта строительства

и областей рядом с ними формируются с соблюдением основных геометрических размеров и необходимого для расчетов уровня детализации. В складывающейся в настоящее время обстановке в связи с ограничениями распространения иностранных программных продуктов трехмерная модель строится на основе использования отечественных и иностранных продуктов с открытым кодом (например, BricsCAD, FreeCAD и др.).

Для аппроксимации геометрии строительного объекта для дальнейшего теплового анализа предлагается выбрать объемный десятиузловой конечный элемент в виде тетраэдра (рис. 3). Выбор данного типа элемента обусловлен тем, что такая форма максимально достоверно аппроксимирует объемную геометрию исследуемых объектов [19, 20].

При разработке конечно-элементной модели и расчетной схемы применяется подход, позволяющий производить решение прямых задач теплообмена с минимальной погрешностью и временем расчета. В областях резкого изменения кривизны поверхности, в окрестности изломов, делается специальное «прижатие» и сгущение ячеек сетки (рис. 3).

В качестве начальных условий для расчета отражательно-излучающих характеристик строительного объекта определяются дата, время, направление солнечной радиации, скорость (направление) ветра, температура наружного воздуха. Также определяются параметры воздуха, интенсивность турбулентности, теплофизические и оптические свойства материалов строительного объекта (табл. 3).

Математическая модель формирования ракурсных прогнозных изображений СО и прилегающей поверхности в ИК-диапазоне включает в себя: уравнение переноса импульса, уравнение неразрывности и уравнения переноса энергии за счет радиационного и конвективного теплообмена [21, 22].

При получении распределений температур по поверхности строительного объекта и прилегающей поверхности вблизи него можно получить искомое изображение строительного объекта в ИК диапазоне.

Таблица 3

Значения теплофизических и оптических параметров, применяемых при расчете

№	Наименование объекта	Эл-т объекта (террит.)	Мат-л	C_p, кг/м^3	λ, Вт/м×К	ρ, кг/м^3	Показатель			Степ. черноты
							поглощения	рассеяния	преломления	
1	Грунт		грунт	840	2,3	1900	0,5	0	1	0,9
2	Сооружение	кровля	рулон. покрытие	1670	1,45	850	0,5	0,1	1	0,91
		стена	кирпич	800	0,5	1400	0,6	0	1	0,93
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…

Заключение

В работе показана возможность использования неавтоклавного пенобетона средней плотности D150 в ограждающих конструкциях, предназначенных для строительства в северных регионах.

Приведен разработанный состав неавтоклавного пенобетона.

Проведен теплотехнический расчет ограждающей конструкции с неавтоклавным пенобетоном, который показал, что толщину теплоизоляционного слоя можно снизить на 50 %.

Предложена методика априорного прогнозирования эффективности применения неавтоклавного пенобетона пониженных плотностей для строительных объектов, возводимых в сложных климатических условиях.

Литература

1. Савинова В., Бродач М. Особенности проектирования и строительства в Арктическом регионе // Здания высоких технологий. Электронный журнал. 2018. № 4. С. 50–56.

2. ГОСТы для Арктики. Минстрой РФ инициировал разработку новых правил строительства за Полярным кругом / Российская газета [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://rg.ru/2020/05/19/reg-szfo/nachata-razrabotka-novyh-pravil-stroitelstva-za-poliarnym-krugom.html (дата обращения: 03.02.2022).

3. Зимон А.Д., Павлов А.Н. Коллоидная химия наночастиц. — М.: Научный мир. 2012. 224 с.: ил.

4. Sychova Anastasia, Solomahin Andrey, Kotovich1 Vitaliy et al. Improving of the monolithic foamconcrete quality for used in the high-rise construc-tions». E3S Web of Conferences 33, 02058 (2018) https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302058 HRC 2017.

5. Гарифуллина А.Ф. Совершенствование методов дубления кожи и меха с использованием зарубежных и отечественных препаратов // Вестник технологического университета. 2016. Том 19. № 18. С. 78–81.

6. Хитров А.В. Технология и свойства пенобетона с учетом природы вводимой пены: дис. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. — СПб. 2006. 330 с.

7. СП 50.13330.2012 СНиП 23-02-2003 Тепловая защита — М.: Минрегион России, 2012. 96 с.

8. СП 13.13330.2020 СНиП 23-01-99* Строительная климатология. — М.: Минстрой России, 2020. 146 с.

9. ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. — М.: Стандартинформ, 2013. 15 с.

10. Инфракрасная и инфракрасная тепловая съемки / Студопедия. [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://studopedia.ru/13_132947_infrakrasnaya-i-infrakrasnaya-teplovaya-s-emki.html (дата обращения: 13.02.2022).

11. Бондур В.Г. Современные подходы к обработке гиперспектральных аэрокосмических изображений // Сборник тезисов докладов НТК «Гиперспектральные приборы и технологии». 17–18 января 2013 г. — Красногорск: ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», 2013. С. 14–18.

12. ГОСТ 25380-2014 Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. — М.: Стандартинформ, 2016. 27 с.

13. ГОСТ Р 56728-2015 Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции. — М.: Стандартинформ, 2016. 27 с.

14. Кондратьев К.Я., Федченко П.П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1947. С. 19–26.

15. Сердитова Н.Е. Методология анализа данных дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности в контуре ГИС: авт. реф. дис. на соиск. уч. ст. докт. геогр. наук. — СПб. 2011. 33 с.

16. Метеорологическое зондирование подстилающей поверхности из космоса. Под ред. К.Я. Кондратьева. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 247 с.

17. Адрианов В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена / В.Н. Адрианов. — М.: Энергия, 1972. 464 с.

18. Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм: учебное пособие. — М.: Министерство обороны СССР. 1986. С. 25–40.

19. ANSYS Fluent User's Guide. Release 15.0. — ANSYS, Inc. November 2013. 2692 p.

20. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости /

С. Патанкар; пер. с англ. В.Д. Виленского. — М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

21. Мягков С.М. Механизм формирования теплового баланса в городской застройке на примере г. Москвы: авт. реф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. — М. 2004. 26 с.

22. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. — СПб: НИУ ИТМО, 2012. 195 с.

References

1. Savinova V., Brodach M. Features of design and construction in the Arctic region // High-tech buildings. Electronic journal. 2018. No. 4. Pp. 50–56.

2. GOST standards for the Arctic. The Ministry of Construction of the Russian Federation initiated the development of new rules for construction beyond the Arctic Circle / Rossiyskaya Gazeta [Electronic resource] / Access mode: https://rg.ru/2020/05/19/reg-szfo/nachata-razrabotka-novyh-pravil-stroitelstva-za-poliarnym-krugom.html (accessed: 03.02.2022).

3. Zimon A.D., Pavlov A.N. Colloidal chemistry of nanoparticles. — M.: Scientific world. 2012. 224 p.: ill.

4. Anastasia Sychova, Andrey Solomahin, Vitaliy Kotovich1 et al. “Improving of the monolithic foamconcrete quality for used in the high-rise construc-tions”. E3S Web of Conferences 33, 02058 (2018) https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302058 HRC 2017.

5. Garifullina A.F. Improvement of methods of tanning leather and fur with the use of foreign and domestic preparations // Bulletin of the Technological University. 2016. Vol. 19. No.18. Pp. 78–81.

6. Khitrov A.V. Technology and properties of foam concrete taking into account the nature of the injected foam: dis. on the job. uch. art. doct. technical sciences. — St. Petersburg, 2006. 330 p.

7. SP 50.13330.2012 SNiP 23-02-2003 Thermal protection — Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2012. 96 p.

8. SP 13.13330.2020 SNiP 23-01-99* Construction climatology — Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2020. 146 p.

9. GOST 30494-2011 Residential and public buildings. Microclimate parameters in the fields. — M.: Standartinform, 2013. 15 p.

10. Infrared and infrared thermal imaging / Studopedia. [Electronic resource] / Access mode: https://studopedia.ru/13_132947_infrakrasnaya-i-infrakrasnaya-teplovaya-s-emki.html (accessed: 13.02.2022).

11. Bondur V.G. Modern approaches to processing hyperspectral aerospace images. Collection of abstracts of reports of the STC «Hyperspectral devices and technologies». January 17–18, 2013. — Krasnogorsk: JSC «Krasnogorsk Plant named after S.A. Zverev», 2013. Pp.1418.

12. GOST 25380-2014 Buildings and structures. Method of measuring the density of thermal currents passing through enclosing structures. — Moscow: Standartinform, 2016. 27 p.

13. GOST R 56728-2015 Buildings and structures. Methodology for determining wind loads on enclosing structures. — Moscow: Standartinform, 2016. 27 p.

14. Kondratiev K.Ya., Fedchenko P.P. Spectral reflectivity and vegetation cognition. — L.: Hydrometeoizdat, 1947. — C.19-26.

15. Serditova N.E. Methodology of data analysis of remote sensing of the atmo-sphere and the underlying surface in the GIS contour: author abst. on the application of the uch. art. doc. geogr. sciences. — St. Petersburg, 2011. 33 p.

16. Meteorological sounding of the underlying surface from space. Edited by K.Y. Kondratiev. — L.: Hydrometeoizdat, 1979. 247 p.

17. Adrianov V.N. Fundamentals of radiation and complex heat transfer / V.N. Adrianov. — M.: Energiya, 1972. 464 p.

18. Chapursky L.I. Reflective properties of natural objects in the range of 400-2500 nm: textbook/ M.: Ministry of Defense of the USSR. 1986. Pp. 25–40.

19. ANSYS Fluent User’s Guide. Release 15.0. — ANSYS, Inc. November 2013. 2692 p.

20. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / S. Patankar; translated from the English by V.D. Vilensky. — M.: Energoatomizdat, 1984. 152 p.

21. Myagkov S.M. The mechanism of heat balance formation in urban development on the example of Moscow: auth. abst. for the degree of Candidate of Technical Sciences. — M., 2004. 26 p.

22. Dulnev G. N. Theory of heat and mass transfer. — St. Petersburg: NIU ITMO, 2012. 195 p.