

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 662.998-4

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1251-1261

Изучение процесса деформации различных видов теплоизоляционных материалов при воздействии низких температур и влаги

Евгений Николаевич Неверов, Игорь Алексеевич Короткий, Павел Сергеевич
Коротких, Александр Николаевич Расщепкин, Саиль Алексеевич Самар
Кемеровский государственный университет (КемГУ); г. Кемерово, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Холодильные машины применяются во многих областях промышленности с целью получения искусственного холода. Для поддержания оптимальных рабочих температур, повышения энергоэффективности и уменьшения энергопотерь при работе холодильных машин используется теплоизоляция. Теплоизоляция — это элементы конструкции холодильной камеры, которые уменьшают процесс теплопередачи и играют роль основного термического сопротивления в конструкции. Ключевые характеристики теплоизоляционных материалов — теплопроводность, плотность, влагопоглощение, гидрофобность, морозостойкость, прочность и горючесть. В зависимости от условий, в которых будет находиться холодильная камера, можно определить, какой материал предпочтительней в качестве теплоизоляции. На данный момент существует множество теплоизоляционных материалов, что может поставить потребителя в тупик, ведь в большинстве случаев в описании характеристик данного материала предоставляется информация лишь о его положительных качествах. Другие особенности, которые делают его применение недостаточно эффективным, не указываются.

Материалы и методы. Проведен анализ разных видов теплоизоляционных материалов, которые являются приоритетными при конструировании холодильных камер. Чтобы понять, какой материал обладает нужными характеристиками, следует воссоздать условия, при которых он будет эксплуатироваться. Для этого используются несколько основных лабораторных воздействий для создания неблагоприятных условий для материалов.

Результаты. Исследованы материалы, которые продемонстрировали сильные и слабые стороны при разных физических условиях.

Выводы. На основе приведенных результатов понятно, какие материалы приоритетны в качестве теплоизоляции холодильной камеры, а какие нуждаются в дополнительной обработке.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплоизоляционный материал, пенополиуретан, минеральная вата, пенопласт, пенополистирол, деформация, холодильная машина

Благодарности. Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 № 1144-р, № соглашения 075-15-2022-1201 от 30.09.2022.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Неверов Е.Н., Короткий И.А., Коротких П.С., Расщепкин А.Н., Самар С.А. Изучение процесса деформации различных видов теплоизоляционных материалов при воздействии низких температур и влаги // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 8. С. 1251–1261. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1251-1261

Автор, ответственный за переписку: Евгений Николаевич Неверов, neverov42@mail.ru.

Study of the deformation process of various types of thermal insulation materials under the influence of low temperatures and moisture

Evgeniy N. Neverov, Igor A. Korotkiy, Pavel S. Korotkih,
Alexander N. Rasshchepkin, Sail A. Samar
Kemerovo State University (KemSU); Kemerovo, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Refrigerating machines are used in many areas of industry to produce artificial cold. To maintain optimal operating temperatures, increase energy efficiency and reduce energy loss, thermal insulation is used during the operation of refrigerating machines. Thermal insulation is the structural elements of the refrigerator, which reduce the heat transfer

process, and plays the role of the main thermal resistance in the structure. The main characteristics of thermal insulation materials are: heat conductivity, density, moisture absorption, hydrophobicity, frost resistance, strength and flammability. Depending on the conditions in which the refrigerator will be located, it is possible to determine which material will be preferable as thermal insulation. At the moment, there are many thermal insulation materials, which in turn puts the consumer at a dead end, because in most cases, the description of the characteristics of this material provides information only about its positive qualities. At the same time, its other features, which make its use insufficiently effective, are kept silent.

Materials and methods. In this article, the analysis of different types of thermal insulation materials, which are priority in the design of cold storage chambers, is carried out. In order to understand which material has the characteristics we need, it is necessary to recreate the conditions under which this material will be used. To do this, several basic laboratory influences are used to create unfavorable conditions for materials.

Results. As a result of these interactions, tests were performed on materials that demonstrated the strengths and weaknesses of materials under different physical conditions.

Conclusions. Based on the above results, it will become clear which materials are priority as thermal insulation of the refrigerator, and which need additional processing.

KEYWORDS: thermal insulation material, polyurethane foam, mineral wool, foam, polystyrene foam, deformation, refrigeration machine

Acknowledgment. The study was carried out as part of a comprehensive scientific and technical program of the full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the areas of exploration and production of solid minerals, ensuring industrial safety, bioremediation, creating new products of deep processing from coal raw materials while consistently reducing the environmental burden on the environment and risks to the life of the population", approved by Order of the Government of the Russian Federation dated 11.05.2022 No. 1144-р, Agreement No. 075-15-2022-1201 dated 30.09.2022.

FOR CITATION: Neverov E.N., Korotkiy I.A., Korotkih P.S., Rasshchepkin A.N., Samar S.A. Study of the deformation process of various types of thermal insulation materials under the influence of low temperatures and moisture. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(8):1251-1261. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1251-1261 (rus.).

Corresponding author: Evgeniy N. Neverov, neverov42@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Холодильные системы применяются во многих отраслях промышленности и работают, как правило, в широком диапазоне режимов, в связи с этим в холодильных камерах и элементах системы требуется использование теплоизоляционных материалов, которые также позволяют повысить энергоэффективность и уменьшить энергопотери. В качестве теплоизоляционных материалов для холодильных предприятий в настоящее время получили большое распространение такие материалы, как: пенопласт, пенополистирол, минеральная вата, пенополиуретан и др. [1–4].

При их применении возникают проблемы, связанные с увлажнением и деформацией теплоизоляции. Поскольку влага является хорошим проводником тепла, ее присутствие в системе изоляции негативно, так как приводит к снижению эффективности теплоизоляции и впоследствии к повышенным затратам электроэнергии [5–7].

Основные характеристики теплоизоляционных материалов — коэффициент теплопроводности, плотность, прочность, паропроницаемость, водопоглощение, огнестойкость, биостойкость и морозостойкость. При подборе теплоизоляционного покрытия надо уделить пристальное внимание каждой из характеристик [8–10].

На рынке имеется значительное разнообразие теплоизоляционных материалов. Каждый материал отличается качеством, тепловым сопротивлением и, что очень важно, ценой. Также в современном мире важную роль играет экологичность теплоизоляционного материала [11–14].

Сегодня существует огромный спрос на теплоизоляционные материалы. Он сформирован не только в отраслях, специализирующихся на производстве и использовании холодильного оборудования, но и промышленными предприятиями, частными лицами, предпринимателями, занимающимися строительством нежилых помещений.

Этот спрос успешно удовлетворяется, так как производится большое количество теплоизоляционных материалов различных видов. Каждый из них обладает набором своих характеристик и свойств, что позволяет выбрать необходимый материал, подходящий для использования в конкретном случае [15, 16].

Цель исследования — анализ современных теплоизоляционных материалов, определение наиболее эффективных или требующих дополнительной обработки при использовании в низкотемпературных установках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процесс деформации разных видов теплоизоляционных материалов при низких температурах изучили с помощью прессы малогабаритного ПМ-МГ4. Данная испытательная машина предназначена для испытаний образцов теплоизоляционных материалов на сжатие при 10%-ной линейной деформации. Испытательная машина изображена на рис. 1.

Для исследования свойств материалов при воздействии низких температур применяли:

- морозильный ларь, способный понизить температуру охлаждаемого объекта до температуры -20°C Liebherr LGT 2325 Index 40A/001;
- весы с пределом допустимой погрешности не более ± 1 г Irit IR-7122;

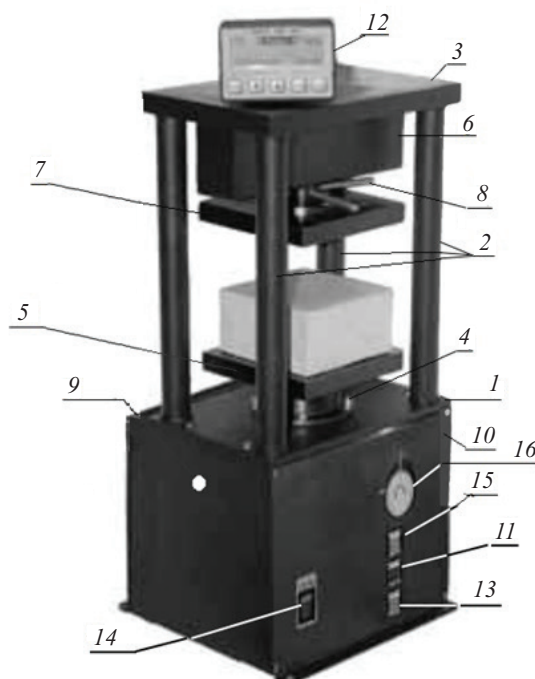


Рис. 1. Общий вид передней части пресса ПМ-МГ4 с электрическим приводом механизма нагружения: 1 — основание; 2 — стойки; 3 — траверса; 4 — механизм нагружения; 5 — нижняя плита; 6 — тензопреобразователь; 7 — верхняя плита; 8 — рукоятка поворота верхней плиты; 9 — светодиод; 10 — крышка батарейного отсека сигнального устройства; 11 — кнопка «Стоп»; 12 — блок электронный; 13 — кнопка «Возврат»; 14 — тумблер включения питания; 15 — кнопка «Пуск»; 16 — регулятор скорости перемещения нижней плиты

Fig. 1. General view of the front part of the PM-MG4 press with an electric drive of the loading mechanism: 1 — base; 2 — racks; 3 — traverse; 4 — loading mechanism; 5 — lower plate; 6 — strain gauge; 7 — upper plate; 8 — handle for turning the upper plate; 9 — Led; 10 — battery cover of the alarm device; 11 — Stop button; 12 — electronic unit; 13 — Return button; 14 — power on toggle switch; 15 — Start button; 16 — speed control of the lower plate movement

• штангенциркуль ШЦ с отсчетом по нониусу
ГОСТ 166–89, ТУ 26.51.33-001-04567838–2018;

- электрошкаф сушильный;
- ванна из нержавеющей материала;
- поддон для взвешивания размером 120 × 120 мм, высота бортов 10 мм.

На рис. 2 представлены теплоизоляционные материалы, используемые в качестве опытных образцов в проведенных испытаниях.

При проведении исследований использовали четыре образца, которые располагались в различных условиях. Для первого и второго метода образец находился в стандартном, сухом состоянии, далее для третьего измерения он вымачивался, после чего высушивался для последнего измерения.

Применяли образцы кубической формы со сторонами 100 ± 1 мм. Образцы выполнены из различных видов теплоизоляционных материалов, которые приведены в таблице.

Использовали четыре метода определения различных свойств теплоизоляционных материалов, которые представлены ниже [17–20].

Исследование теплоизоляционных материалов на установление прочности на сжатие при 10%-ной линейной деформации (1-й метод). В качестве ис-

следуемого материала использовали: вспененный пенополистирол, пенопласт, пенополиуретан, минеральную вату.

Метод определения прочности на сжатие при 10%-ной линейной деформации распространяется на неорганические волокнистые и органические ячеистые теплоизоляционные материалы. Каждый из теплоизоляционных материалов изучался в четырех состояниях: полностью высушенный образец, температура которого на момент испытания была равна комнатной; полностью высушенный образец, температура которого была понижена до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; образец, вымоченный до этого св ванне с водой в течение 24 ч и температурой $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; образец также вымоченный в ванне с водой в течение 24 ч, после чего замороженный до температуры $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, но после этого высушенный и исследуемый при комнатной температуре.

Сущность метода заключается в измерении значения сжимающих усилий, вызывающих деформацию образца по толщине на 10 % при соответствующих условиях испытания.

На нижнюю плиту пресса ПМ-МГ4 помещается испытуемый образец. Для проведения испытания образец устанавливают в машину таким образом,



Рис. 2. Опытные образцы теплоизоляционных материалов: 1 — пенополистирол; 2 — пенопласт; 3 — минеральная вата; 4 — пенополиуретан

Fig. 2. Prototypes of thermal insulation materials: 1 — expanded polystyrene; 2 — styrofoam; 3 — mineral wool; 4 — polyurethane foam

Виды опытных образцов теплоизоляционных материалов

Types of prototypes of thermal insulation materials

Название материала Material name	Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·С) Thermal conductivity coefficient, W/(m·C)	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па) Vapor permeability, mg/(m·h·Pa)
Пенополистирол Polystyrene foam	22	0,041	0,05
Пенопласт Styrofoam	9	0,039	0,23
Пенополиуретан Polyurethane foam	35	0,041	0,05
Минеральная вата Mineral wool	30	0,056	0,56

чтобы сжимающее усилие действовало по вертикальной оси образца, и измеряют нагрузку, при которой он уплотняется (деформируется) на 10 %. Измерение деформации образца производят штангенциркулем.

Прочность на сжатие при 10%-ной линейной деформации σ_{10} , МПа, вычисляют по формуле [1]:

$$\sigma_{10} = \frac{P}{lb},$$

(1)

где P — нагрузка при 10%-ной линейной деформации, Н; l — длина образца, мм; b — ширина образца, мм.

Исследование теплоизоляционных материалов на определение предела прочности при сжатии (2-й метод). Испытывали пенополистирол, пенопласт и пенополиуретан. Метод определения предела прочности при сжатии распространяется на все виды теплоизоляции в виде волокнистых неорганических утеплителей и органических ячеистых, кро-

ме ячеистого бетона. В данном испытании также исследуются различные теплоизоляционные материалы в таких же состояниях, что и в предыдущем методе.

Сущность метода состоит в измерении значения сжимающих усилий, вызывающих разрушение образца при соответствующих условиях испытания.

Размещение образца на прессе ПМ-МГ4 аналогично предыдущему методу.

Разрушающей считают наибольшую нагрузку, отмеченную при испытании образца в момент его разрушения.

Предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа, вычисляют по формуле [2]:

$$R_{сж} = \frac{P_p}{lb},$$

(2)

где P_p — разрушающая нагрузка, Н.

Исследование теплоизоляционных материалов на установление упругости (3-й метод). Метод

определения упругости распространяется на неорганические волокнистые и органические ячеистые теплоизоляционные материалы.

Суть метода заключается в измерении толщины образца изделия при воздействии сжимающей удельной нагрузки в определенной последовательности.

На нижнюю плиту пресса ПМ-МГ4 помещается испытуемый образец. После этого верхняя пластина прижимает образец сверху так, чтобы не было зазоров. Далее подается нагрузка на образец в размере 500 Па. При данной нагрузке образец выдерживается в течение 5 мин. Затем происходит замер толщины образца штангенциркулем. После этого осуществляется увеличение нагрузки до 2000 Па. Образец выдерживается при этой нагрузке 5 мин, после чего нагрузка убирается и проводится замер изменения толщины.

Упругость Y , %, рассчитывают следующим образом [3]:

$$Y = \frac{h_1}{h} 100, \quad (3)$$

где h_1 — толщина образца после снятия нагрузки, мм; h — первоначальная толщина образца, мм.

Изучение теплоизоляционных материалов на определение влагопоглощения по массе (4-й метод). Метод определения водопоглощения при полном погружении образца в воду заключается в измерении массы воды, которую поглотил образец сухого материала при полном погружении в течение некоторого времени.

Влагопоглощение W , %, устанавливают по формуле [4]:

$$W = \frac{m_1 - m_2 - m_3}{m_2} 100, \quad (4)$$

где m_1 — масса образца после насыщения водой и поддона для взвешивания, г; m_2 — масса образца, предварительно высушенного до постоянной массы, г; m_3 — масса сухого поддона для взвешивания, г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получены данные, которые представлены на диаграмме рис. 3.

Как видно на диаграмме, пенопласт и минеральная вата имеют наиболее низкие показатели при нагрузке, в отличие от пенополистирола и пенополиуретана. Так же у пенопласта более стабильные показатели состояния вне зависимости от внешних условий испытания. Наиболее нестабильные показатели заметны у минеральной ваты. Связано это, в первую очередь, со структурой минеральной ваты, которая характеризуется высокой волокнистостью. Этот материал обладает низким пределом прочности по сравнению с другими теплоизоляционными материалами. Но так как отличается высоким влагопоглощением, то при затвердевании влаги увеличивается предел ее прочности.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод что образцы, подверженные заморозке и вымачиванию, а после приведенные в нормальные условия, обладают меньшей прочностью на сжатие

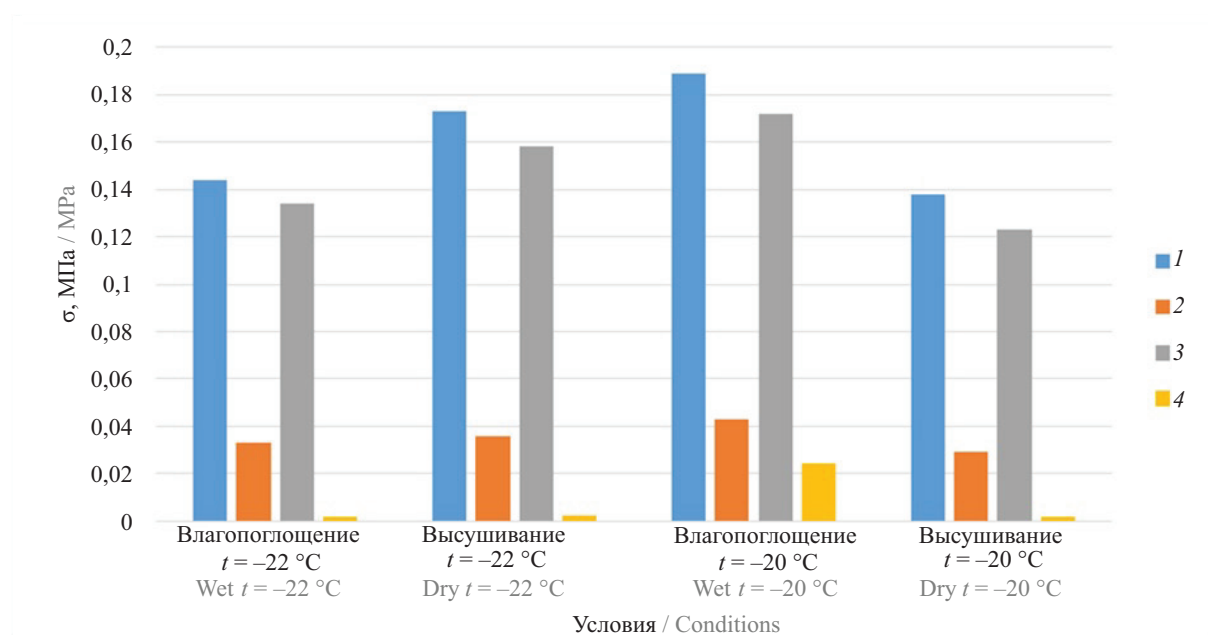


Рис. 3. Зависимость прочности на сжатие при 10%-ной линейной деформации образцов: 1 — пенополистирол; 2 — пенопласт; 3 — пенополиуретан; 4 — минеральная вата

Fig. 3. Dependence of compressive strength at 10% linear deformation of samples: 1 — expanded polystyrene; 2 — styrofoam; 3 — polyurethane foam; 4 — mineral wool

при 10%-ной линейной деформации, также образцы, находящиеся в условиях пониженной температуры и влажности, имеют повышенную прочность, так как при поглощении и затвердевании влаги при низких температурах увеличивается предел прочности материала.

На рис. 4 приведены результаты испытания прочности теплоизоляционных материалов на сжатие. Испытания проводились над следующими материалами: пенополистирол, пенопласт и пенополиуретан.

В отличие от испытания прочности на сжатие при 10%-ной линейной деформации, где у пенополистирола были наибольшие показатели, здесь наилучшие характеристики показывает пенополиуретан. Наиболее низкие результаты продемонстрировал пенопласт, который по сравнению с пенополистиролом и пенополиуретаном имеет низкий запас прочности. Из диаграммы видно, что подверженные замораживанию и вымачиванию, а после приведенные в нормальные условия образцы обладают меньшим пределом прочности на сжатие, также образцы, находящиеся в условиях пониженной температуры и влажности, имеют повышенную прочность, поскольку при поглощении и затвердевании влаги при низких температурах увеличивается предел прочности материала.

На рис. 5 показаны результаты испытания теплоизоляционных материалов на определение упругости.

При испытаниях на упругость наиболее стабильные показатели относительно остальных теплоизоляционных материалов показал пенополиуретан. В ре-

зультате всех проведенных испытаний его упругость находилась в диапазоне от 93 до 97 %. Это говорит о повышенной стабильности данного материала.

Самые нестабильные результаты у минеральной ваты, диапазон изменения ее упругости на протяжении всех испытаний варьируется от 68 до 95 %. Самые высокие показатели упругости минеральная вата проявляла при температуре $t = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и высокой влажности.

Наивысшие показатели упругости пенопласта были достигнуты при температуре $t = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и высокой влажности, а наименьшие у образца, который предварительно выдержали в воде на протяжении 24 ч, а после этого заморозили до температуры $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем высушили и исследовали при температуре образца, равной комнатной.

После тщательного рассмотрения всех образцов можно сделать вывод, что наиболее стабильным из всех является пенополиуретан. Пенополистирол и пенополиуретан эффективны при низких температурах, вне зависимости от влажности. Исследуемая характеристика минеральной ваты эффективна лишь при низкой температуре и высокой влажности. Вызвано это тем, что при высокой влажности минеральная вата поглощает влагу и становится более упругой.

Повышенная и стабильная упругость пенополиуретана вызвана физическим строением данного вещества. Так как при его затвердевании на поверхности образуется прочная газонаполненная ячеистая масса, повышенная прочность которой создает условия увеличенной упругости.

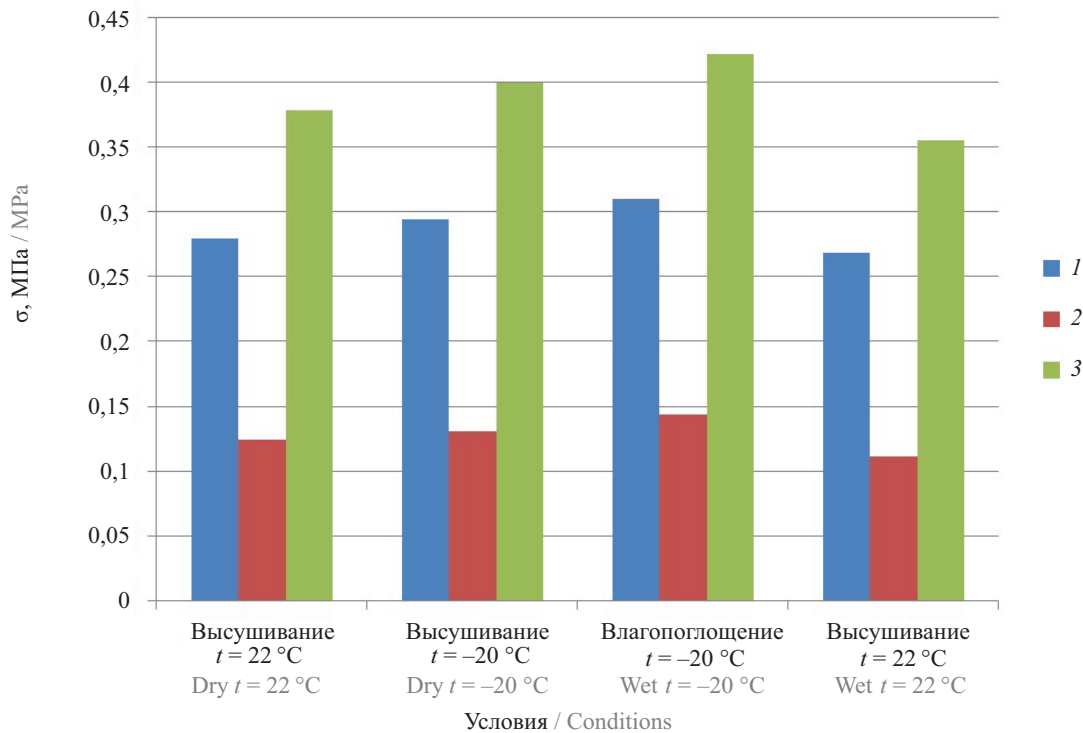


Рис. 4. Зависимость прочности на сжатие: 1 — пенополистирол; 2 — пенопласт; 3 — пенополиуретан

Fig. 4. Dependence of compressive strength: 1 — expanded polystyrene; 2 — styrofoam; 3 — polyurethane foam

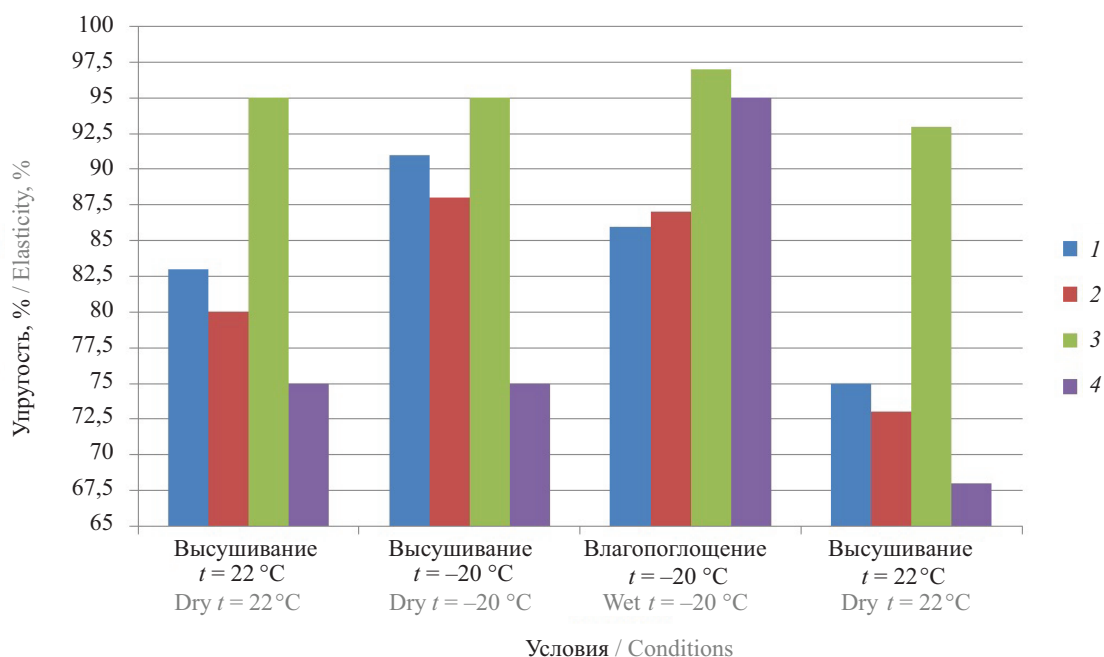


Рис. 5. Зависимость характеристик теплоизоляционных материалов при определении упругости: 1 — пенополистирол; 2 — пенопласт; 3 — пенополиуретан; 4 — минеральная вата

Fig. 5. Dependence of the characteristics of thermal insulation materials in determining elasticity: 1 — expanded polystyrene; 2 — styrofoam; 3 — polyurethane foam; 4 — mineral wool

На рис. 6 представлены результаты испытания теплоизоляционных материалов на влагопоглощение по массе.

Наибольшее влагопоглощение показал образец из минеральной ваты 1558 %, что свидетельствует о невозможности использования данного материала

в местах с повышенной влажностью, так как это приведет к быстрому приходу его в негодность. Это связано с физическими свойствами минеральной ваты, так как в отличие от остальных материалов она не имеет ячеистой структуры, у нее структура ваты, которая обладает высоким влагопоглощением.

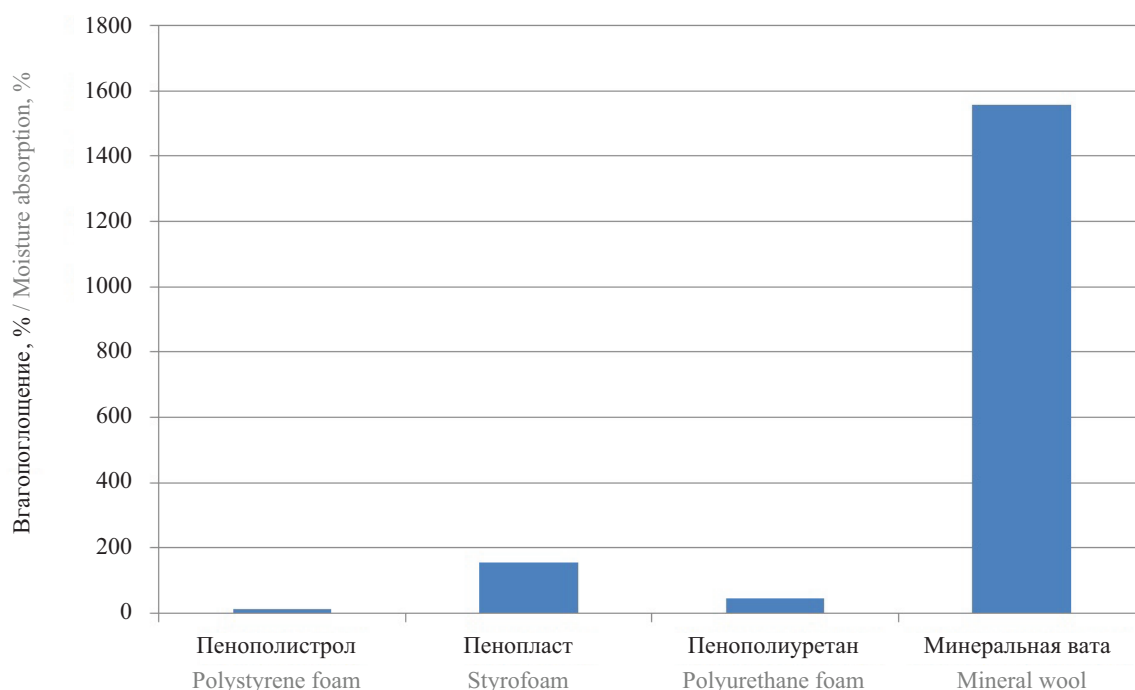


Рис. 6. Результаты испытания теплоизоляционных материалов на влагопоглощение по массе

Fig. 6. Results of testing of thermal insulation materials for moisture absorption by weight

Наилучшие характеристики у пенополистирола, его влагопоглощение составило 13,6 %. Влагопоглощение у пенополиуретана — 45,7 %, у пенопласта — 255,6 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, изменение температуры, а также влажности теплоизоляционных материалов напрямую влияет на их характеристики прочности, а именно при постоянном воздействии низких температур и влаги в дальнейшем происходит снижение прочности материала. Это необходимо учитывать при выборе теплоизоляционного материала

и осуществлять подбор в соответствии с условиями, в которых он будет эксплуатироваться.

Наиболее подверженными из представленных теплоизоляционных материалов к воздействию низких температур и влаги являются изделия из минеральной ваты, в частности, наиболее пагубное влияние имеет именно влага. Это связано с тем, что у минеральной ваты очень высокое влагопоглощение. Соответственно при выборе минеральной ваты в качестве теплоизоляции, необходимо защитить ее от попадания влаги путем гидроизоляции.

Пенополиуретан и пенополистирол оказались наиболее стойкими материалами и, как правило, не требуют дополнительной защиты от влаги.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмичева И.Г. Минеральная вата // Наука и образование: тенденции и перспективы. 2017. С. 3–4. EDN ZUVFWB.

2. Местников А.Е. Прогнозирование структуры и свойств термореактивных пенопластов с использованием теории теплоустойчивости // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11–2. С. 299–304. DOI: 10.17513/snt.38378 EDN AEPICW.

3. Колосов Р.А. Применение пенопласта в качестве строительного материала // Наука, образование и культура. 2019. № 8 (42). С. 23–24. EDN IMSLMM.

4. Johnson G.R., Holmquist T.J., Chocron S., Scott N.L. Response of a polystyrene foam subjected to large strains and high pressures // The European Physical Journal Special Topics. 2018. Vol. 227. Issue 1–2. Pp. 61–71. DOI: 10.1140/epjst/e2018-00072-8

5. Eskander S.B., Tawfik M.E., Tawfic M.L. Mechanical, flammability and thermal degradation characteristics of rice straw fiber-recycled polystyrene foam hard wood composites incorporating fire retardants // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018. Vol. 132. Issue 2. Pp. 1115–1124. DOI: 10.1007/s10973-018-6984-6

6. Montaser W.M., Shaaban I.G., Zaher A.H., Khan S.U., Sayed M.N. Structural behaviour of polystyrene foam lightweight concrete beams strengthened with FRP laminates // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2022. Vol. 16. Issue 1. DOI: 10.1186/s40069-022-00549-1

7. Yuan C., Wenhua Z., Lei Z., Wanting Z., Yunsheng Z. Dynamic impact compressive performance of expanded polystyrene (EPS)-foamed concrete // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2022. Vol. 22. Issue 4. DOI: 10.1007/s43452-022-00486-6

8. Гунченко Т.С., Булуцкая В.Г. Сравнительный анализ параметров утеплителей на основе полимерных материалов: пенопласт и экструдированный пенополистирол // IV Междунар. студ. строит. форум – 2019 :

сб. докл. (к 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова). 2019. С. 260–266. EDN NXVNGS.

9. Петрюк И.П. Моделирование прочностных характеристик пенопластов // Пластические массы. 2020. № 5–6. С. 36–37. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-5-6-36-37 EDN XBOBDJ.

10. Malai A., Youwai S. Stiffness of expanded polystyrene foam for different stress states // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. 2021. Vol. 7. Issue 4. DOI: 10.1007/s40891-021-00321-7

11. Проскурова И.Д., Ахатов Т.Р. Исследование применения минеральных ват в утеплении зданий и сооружений // Проблемы обеспечения химической безопасности : сб. тр. II Всерос. науч.-практ. конф. 2021. С. 56–60. EDN KGHMUY.

12. Porkar B., Atmianlu P.A., Mahdavi M., Baghdadi M., Farimaniraad H., Ali Abdoli M. Chemical modification of polystyrene foam using functionalized chitosan with dithiocarbamate as an adsorbent for mercury removal from aqueous solutions // Korean Journal of Chemical Engineering. 2023. Vol. 40. Issue 4. Pp. 892–902. DOI: 10.1007/s11814-023-1387-1

13. He J., Wu H., Zhong L., Zhong Q., Yang Q., Ye X. et al. Mechanical properties and thermal conductivity of lightweight and high-strength carbon-graphite thermal insulation materials // Journal of Materials Science. 2022. Vol. 57. Issue 6. Pp. 4166–4179. DOI: 10.1007/s10853-021-06862-6

14. Akan A.E. Determination and modeling of optimum insulation thickness for thermal insulation of buildings in all city centers of Turkey // International Journal of Thermophysics. 2021. Vol. 42. Issue 4. DOI: 10.1007/s10765-021-02799-9

15. Zhao R., Guo H., Yi X., Gao W., Zhang H., Bai Y. et al. Research on thermal insulation properties of plant fiber composite building material : a review // International Journal of Thermophysics. 2020. Vol. 41. Issue 6. DOI: 10.1007/s10765-020-02665-0

16. Luo C., Zhao Z., Zhang D., Li C., Liu C., Li Y. et al. Temperature effect on the thermal properties of insulation paper // *Electrical Engineering*. 2021. Vol. 103. Issue 2. Pp. 1083–1091. DOI: 10.1007/s00202-020-01129-w

17. Akhmetova I.G., Lapin K.V., Akhmetov T.R., Balzamova E.Yu. Applying modern information technologies for thermal energy accounting in the operational search for humidification of thermal insulation // *Thermal Engineering*. 2021. Vol. 68. Issue 5. Pp. 410–416. DOI: 10.1134/S0040601521040017

18. Plotnikov A.A. Stabilizing the temperature regime of a frozen foundation bed using thermal insulation and cooling mechanisms // *Soil Mechanics and Founda-*

tion Engineering. 2020. Vol. 57. Issue 4. Pp. 329–335. DOI: 10.1007/s11204-020-09674-z

19. Aniskin N.A., Chuc N.T., Khanh P.K. The use of surface thermal insulation to regulate the temperature regime of a mass concrete during construction // *Power Technology and Engineering*. 2021. Vol. 55. Issue 1. Pp. 1–7. DOI: 10.1007/s10749-021-01310-6

20. Danaci H.M., Akin N. Thermal insulation materials in architecture: a comparative test study with aerogel and rock wool // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. Issue 48. Pp. 72979–72990. DOI: 10.1007/s11356-022-20927-2

Поступила в редакцию 7 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 5 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 7 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Евгений Николаевич Неверов** — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой техносферной безопасности; **Кемеровский государственный университет (КемГУ)**; 650000, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6; РИНЦ ID: 7351-6740, Scopus: 57205447914, ResearcherID: H-3524-2017, ORCID: 0000-0002-3542-786X; neverov42@mail.ru;

Игорь Алексеевич Короткий — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплохладотехники; **Кемеровский государственный университет (КемГУ)**; 650000, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6; РИНЦ ID: 352206, Scopus: 57190978039, ResearcherID: B-9806-2018, ORCID: 0000-0002-7623-0940; krot69@mail.ru;

Павел Сергеевич Коротких — старший преподаватель кафедры теплохладотехники; **Кемеровский государственный университет (КемГУ)**; 650000, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6; РИНЦ ID: 1055421, Scopus: 57207457349, ResearcherID: GYD-7158-2022, ORCID: 0000-0002-4546-0276; korotkix42@gmail.com;

Александр Николаевич Расщепкин — доктор технических наук, доцент кафедры теплохладотехники; **Кемеровский государственный университет (КемГУ)**; 650000, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6; SPIN-код: 8124-4667, Scopus: 57216432381, ORCID: 0000-0002-6578-5545; technoholod@mail.ru;

Сайль Алексеевич Самар — студент; **Кемеровский государственный университет (КемГУ)**; 650000, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6; ORCID: 0000-0002-6441-9527; johby-fox@mail.ru.

Вклад авторов:

Неверов Е.Н. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, участие в разработке учебных программ и их реализации, написание исходного текста.

Короткий И.А. — участие в разработке учебных программ и их реализации, редактирование текста.

Коротких П.С. — участие в разработке учебных программ и их реализации, редактирование текста.

Расщепкин А.Н. — участие в разработке учебных программ и их реализации, редактирование текста.

Самар С.А. — обработка материалов, редактирование текста, оформление текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kuzmicheva I.G. Mineral wool. *Science and Education: Trends and Prospects*. 2017; 3-4. EDN ZUVFWB. (rus.).

2. Mestnikov A.E. Forecasting the structure and properties of thermoreactive foams using the theory of heat resistance. *Modern High Technologies*. 2020; 11-2:299-304. DOI: 10.17513/snt.38378. EDN AEPICW. (rus.).

3. Kolosov R.A. Application foam as a building material. *Science, Education and Culture*. 2019; 8(42):23-24. EDN IMSLMM. (rus.).

4. Johnson G.R., Holmquist T.J., Chocron S., Scott N.L. Response of a polystyrene foam subjected to large strains and high pressures. *The European Physi-*

cal Journal Special Topics. 2018; 227(1-2):61-71. DOI: 10.1140/epjst/e2018-00072-8

5. Eskander S.B., Tawfik M.E., Tawfic M.L. Mechanical, flammability and thermal degradation characteristics of rice straw fiber-recycled polystyrene foam hard wood composites incorporating fire retardants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018; 132(2):1115-1124. DOI: 10.1007/s10973-018-6984-6

6. Montaser W.M., Shaaban I.G., Zaher A.H., Khan S.U., Sayed M.N. Structural behaviour of polystyrene foam lightweight concrete beams strengthened with FRP laminates. *International Journal of Concrete*

Structures and Materials. 2022; 16(1). DOI: 10.1186/s40069-022-00549-1

7. Yuan C., Wenhua Z., Lei Z., Wanting Z., Yunsheng Z. Dynamic impact compressive performance of expanded polystyrene (EPS)-foamed concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2022; 22(4). DOI: 10.1007/s43452-022-00486-6

8. Gunchenko T.S., Burlutskaya V.G. Comparative analysis of insulation parameters based on polymer materials: foam and extruded polystyrene foam. *IV International Student Building Forum – 2019 : collection of reports (To the 65th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov)*. 2019; 260-266. EDN NXVNGS. (rus.).

9. Petryuk I.P. Modeling the strength characteristics of foam plastics. *Plasticheskie massy*. 2020; 5-6:36-37. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-5-6-36-37. EDN XBOBDJ. (rus.).

10. Malai A., Youwai S. Stiffness of expanded polystyrene foam for different stress states. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2021; 7(4). DOI: 10.1007/s40891-021-00321-7

11. Proskurova I.D., Akhatov T.R. Research of the application of mineral water insulation of buildings and structures. *Problems of ensuring chemical safety : collection of proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2021; 56-60. EDN KGHMUY. (rus.).

12. Porkar B., Atmianlu P.A., Mahdavi M., Baghdadi M., Farimaniraad H., Ali Abdoli M. Chemical modification of polystyrene foam using functionalized chitosan with dithiocarbamate as an adsorbent for mercury removal from aqueous solutions. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2023; 40(4):892-902. DOI: 10.1007/s11814-023-1387-1

13. He J., Wu H., Zhong L., Zhong Q., Yang Q., Ye X. et al. Mechanical properties and thermal conductivity of lightweight and high-strength carbon-graphite thermal insulation materials. *Journal of Materials Sci-*

ence. 2022; 57(6):4166-4179. DOI: 10.1007/s10853-021-06862-6

14. Akan A.E. Determination and Modeling of Optimum insulation thickness for thermal insulation of buildings in all city centers of Turkey. *International Journal of Thermophysics*. 2021; 42(4). DOI: 10.1007/s10765-021-02799-9

15. Zhao R., Guo H., Yi X., Gao W., Zhang H., Bai Y. et al. Research on thermal insulation properties of plant fiber composite building material : a review. *International Journal of Thermophysics*. 2020; 41(6). DOI: 10.1007/s10765-020-02665-0

16. Luo C., Zhao Z., Zhang D., Li C., Liu C., Li Y. et al. Temperature effect on the thermal properties of insulation paper. *Electrical Engineering*. 2021; 103(2):1083-1091. DOI: 10.1007/s00202-020-01129-w

17. Akhmetova I.G., Lapin K.V., Akhmetov T.R., Balzamova E.Yu. Applying modern information technologies for thermal energy accounting in the operational search for humidification of thermal insulation. *Thermal Engineering*. 2021; 68(5):410-416. DOI: 10.1134/S0040601521040017

18. Plotnikov A.A. Stabilizing the temperature regime of a frozen foundation bed using thermal insulation and cooling mechanisms. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020; 57(4):329-335. DOI: 10.1007/s11204-020-09674-z

19. Aniskin N.A., Chuc N.T., Khanh P.K. The use of surface thermal insulation to regulate the temperature regime of a mass concrete during construction. *Power Technology and Engineering*. 2021; 55(1):1-7. DOI: 10.1007/s10749-021-01310-6

20. Danaci H.M., Akin N. Thermal insulation materials in architecture: a comparative test study with aerogel and rock wool. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022; 29(48):72979-72990. DOI: 10.1007/s11356-022-20927-2

Received April 7, 2023.

Adopted in revised form on June 5, 2023.

Approved for publication on July 7, 2023.

B I O N O T E S : **Evgeniy N. Neverov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technosphere Security; **Kemerovo State University (KemSU)**; 6 Krasnaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation; ID RSCI: 7351-6740, Scopus: 57205447914, ResearcherID: H-3524-2017, ORCID: 0000-0002-3542-786X; neverov42@mail.ru;

Igor A. Korotkiy — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Heat and Cooling Engineering; **Kemerovo State University (KemSU)**; 6 Krasnaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation; ID RSCI: 352206, Scopus: 57190978039, ResearcherID: B-9806-2018, ORCID: 0000-0002-7623-0940; krot69@mail.ru;

Pavel S. Korotkih — senior lecturer of the Department of Heat and Cooling Engineering; **Kemerovo State University (KemSU)**; 6 Krasnaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation; ID RSCI: 1055421, Scopus: 57207457349, ResearcherID: GYD-7158-2022, ORCID: 0000-0002-4546-0276; korotkix42@gmail.com;

Alexander N. Rasshchepkin — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Cooling Engineering; **Kemerovo State University (KemSU)**; 6 Krasnaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation; SPIN-code: 8124-4667, Scopus: 57216432381, ORCID: 0000-0002-6578-5545; technoholod@mail.ru;

Sail A. Samar — student; **Kemerovo State University (KemSU)**; 6 Krasnaya st., Kemerovo, 650000, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6441-9527; johby-fox@mail.ru.

Contribution of the authors:

Evgeniy N. Neverov — scientific guidance, research concept, methodological research, place in the development of local programs and operations, writing the source text.

Igor A. Korotkiy — areas in the development of local programs for their implementation, text storage.

Pavel S. Korotkih — areas in the development of local programs for their implementations, text storage.

Alexander N. Rasshchepkin — areas in the development of local programs for their implementation, text storage.

Sail A. Samar — material processing, text editing, text storage, texture modification, text processing, final results.

The authors declare that there is no conflict of interest.