

УДК 699.865:697.1:697.112

DOI: 10.46548/21vek-2022-1157-0017

**О МЕТОДИКЕ ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ОБЪЕМА ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЗАЩИЩЕННОСТИ НАСЕЛЕНИЯ В ЗДАНИЯХ  
ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ СВЯЗАННЫХ С НАРУШЕНИЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

© 2022

**Рыбаков Анатолий Валерьевич**, доктор технических наук, профессор,  
начальник научно-исследовательского центра

**Геккель Иван Яковлевич**, адъюнкт научно-исследовательского центра

**Кодзоев Абдул-Азит Исламович**, заместитель начальника факультета

**Поляков Александр Юрьевич**, заместитель начальника управления, начальник отдела радиационной, химической, биологической, инженерной, медицинской защиты и первоочередного жизнеобеспечения управления гражданской обороны и защиты населения Главного управления МЧС России по Калининградской области

*Академия гражданской защиты МЧС России*

*(Россия, 141435, Московская область, г.о. Химки, мкрн. Новогорск,*

*e-mails: anatoll\_rubakov@mail.ru, i.gekkel@amchs.ru, a-a.kodzoev@amchs.ru, myasorubka\_87@mail.ru)*

**Аннотация.** В статье предложена методика обоснования рационального объема инженерно-технических мероприятий по повышению защищенности населения в здании при чрезвычайных ситуациях, связанных с нарушением теплоснабжения. Методика заключается в выборе такого перечня и объема мероприятий, которые при их проведении увеличат защищенность населения в здании за счет повышения времени его остывания с учетом ограничений на ресурсы. На основе проведенного эксперимента предложен алгоритм нахождения параметров модели обоснования объема мероприятий в виде математической модели, характеризующей вклад и значимость каждого параметра в повышение уровня защищенности населения в жилом здании. Предложен алгоритм решения оптимизационной задачи, который при помощи метода проекции градиента позволяет обосновать рациональный объем мероприятий в условиях ограниченных ресурсов на их проведение. Сделаны выводы о возможности применения разработанной методики и необходимости разработки рекомендаций для органов управления и сил РСЧС по применению методических рекомендаций с целью повышения защищенности населения в здании при чрезвычайной ситуации, связанной с нарушением теплоснабжения.

**Ключевые слова:** теплопотери, математическая модель, защищенность, теплоснабжение, тепловая защита здания, показатель защищенности, многофакторная модель, регрессионная модель.

**ON THE METHOD FOR DETERMINING THE RATIONAL VOLUME OF MEASURES TO PROTECT  
THE POPULATION IN BUILDINGS IN EMERGENCY SITUATIONS ASSOCIATED  
WITH THE BREAKDOWN OF THE HEAT SUPPLY**

© 2022

**Rybakov Anatoly Valerievich**, doctor of technical sciences, professor, head of the research center

**Gekkel Ivan Yakovlevich**, adjunct of the research center

**Kodzoev Abdul-Azit Islamovich**, deputy head of the faculty

**Polyakov Alexander Yuryevich**, deputy head of department - head of the department of radiation, chemical, biological, engineering, medical protection and priority life support of the department of civil defense and population protection main directorate of the Ministry of emergency situations of Russia for the Kaliningrad region

*Civil Defens Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia*

*(Russia, 141435, Moscow region, Khimki, Novogorsk,*

*e-mails: anatoll\_rubakov@mail.ru, i.gekkel@amchs.ru, aa.kodzoev@amchs.ru, myasorubka\_87@mail.ru)*

**Abstract.** The article proposes a method for determining the rational scope of engineering and technical measures to improve the security of the population in a building in emergency situations associated with a violation of heat supply. The methodology consists in choosing such a list and scope of activities that, when carried out, will increase the security of the population in the building by increasing its cooling time, taking into account resource constraints. The introduction contains a general structural and functional scheme of the developed scientific and methodological apparatus. An algorithm for finding the parameters of the model for determining the scope of measures is proposed in the form of a mathematical model that describes the contribution and significance of each parameter to increasing the level of protection of the population in a residential building. An algorithm for solving the optimization problem is proposed, which, using the gradient projection method, makes it possible to determine the rational scope of measures under conditions of limited resources for their implementation. Conclusions are drawn about the possibility of applying the developed methodology and the need to develop recommendations for the authorities and forces of the RSChS on the application of methodological recommendations in order to increase the security of the population in the building in an emergency situation associated with a violation of heat supply.

**Keywords:** heat loss, mathematical model, security, heat supply, thermal protection of the building, security index, multifactorial model, regression model.

**Введение.** В настоящее время в Российской Федерации большинство зданий строится с приемлемым уровнем защищенности населения от чрезвычайных ситуаций, связанных с нарушением теплоснабжения (далее – ЧС) [4]. Здания существующего жилого фонда в основном обладают низким уровнем тепловой защиты, в связи с чем возникает проблемная ситуация, которая заключается в низком уровне защищенности населения в жилом здании при ЧС [10].

В связи с большим многообразием инженерно-технических мероприятий, широкий диапазон стоимости их выполнения, выбор перечня и объемов мероприятий по повышению защищенности населения в жилых зданиях становится непростой задачей. Существует потребность в научно-методическом обеспечении таких мероприятий, при этом существующий научно-методический аппарат не в полной мере

способен осуществить такое обеспечение. Требуется дополнительная работа, основанная на проведении экспериментов, решении оптимизационной задачи [7]. При этом при обосновании объема и перечня инженерно-технических мероприятий возникают частные задачи, связанные с особенностями зданий, условиями эксплуатации, климатическими характеристиками и т.д. [5].

Для решения сформулированной задачи из [3] возникла необходимость в исследовании влияния параметров здания на повышение защищенности населения и разработки методики определения объема мероприятий по повышению защищенности населения в здании при ЧС.

Общая структурно-функциональная схема разработанного научно-методического аппарата методики показана на рисунке 1.

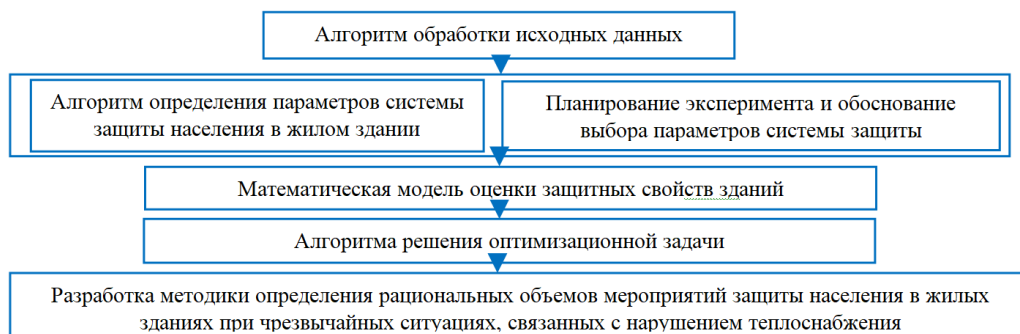


Рисунок 1 – Схема научно-методического аппарата методики определения рациональных объемов мероприятий защиты населения в зданиях при чрезвычайных ситуациях, связанных с нарушением теплоснабжения

**Целью** работы является разработка методики обоснования рациональных объемов мероприятий защиты населения в зданиях при чрезвычайных ситуациях, связанных с нарушением теплоснабжения, на основе математического моделирования и экспериментальных данных определения влияния параметров на степень защищенности населения. Применение данной методики позволит обеспечить приемлемый уровень защиты населения в здании при возникновении ЧС.

**Материалы и результаты исследования.** Алгоритм определения параметров системы защиты населения в жилом здании основан на применении методов корреляционного анализа [2], комбинаторики, а также информационно-технических методов (объектно-ориентированного программирования, синтаксического анализа Web-страниц, проектирования и работы с базами данных и др.) [1]. В результате работы алгоритма наборы данных по жилым зданиям и погодным условиям проходят процедуру обработки, выделяются наиболее значимые параметры для конкретного типа зданий в конкретном регионе, влияющие на коэффициент тепловой аккумуляции [9], исходные данные преобразуются в машиночитаемую таблицу, пригодную для проведения численного эксперимента.

Планирование эксперимента и его проведение позволяет выбрать из перечня исходных данных наиболее значимые параметры [12]. Натурные исследования теплоаккумулирующей способности жилого

здания проводят в реальных климатических условиях эксплуатации [13], далее производится обработка результатов натурных измерений с отсечением отдельных значений параметров, а теплотери здания определяются по формулам [5], полученным эмпирическим путем. После определения теплотери здания, вычисляют коэффициент тепловой аккумуляции  $\beta$ . По полученным параметрам тепловой защиты зданий судят о качестве теплоизоляционных свойств ограждающих конструкций и далее о защитных качествах здания в целом.

При проведении исследования, направленного на выявление зависимости между коэффициентом тепловой аккумуляции в жилом здании и параметрами конструктивных элементов, область факторного пространства конкретизируется и характеризуется в начальном состоянии объекта исследования факторами  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ .

Выбор параметров обусловлен их влиянием на коэффициент тепловой аккумуляции, при этом каждый параметр варьируется в пределах ограничений по существующим нормам.

Толщина слоя дополнительной теплоизоляции ограждающих конструкций  $\delta_i$  с заданными теплотехническими и теплофизическими свойствами и существующим конструктивным решением характеризует величину термического сопротивления, на которую повышается сопротивление теплопередаче существу-

ющего ограждения [14]. На нее накладывается ограничение существующими строительными нормами. Теплоемкость  $c_i$  и плотность  $\rho_i$  ограждения изменяется в зависимости от выбранных материалов конструкций. Площадь ограждения  $F_i$  зависит от геометрических размеров здания. Она является постоянной величиной при анализе параметров системы защиты. Теплопроводность ограждения  $\lambda_i$  изменяется в зависимости от типа материала конструкции. Термическое сопротивление оконных и балконных заполнений  $R_i$  дает представление об уровне теплозащитных качеств светопрозрачных конструкций. Кратностью воздухообмена в жилом помещении  $L$  оказывает влияние на коэффициент тепловой аккумуляции за счет сокращения теплопотерь при воздухообмене.

При проведении вычислений использовались зависимости, приведенные в СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003» [15], СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» [16] и СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» [17].

Эксперимент проводится с изменением параметров на трех уровнях. Значения коэффициента тепловой аккумуляции получается при проведении натурного эксперимента. Далее по плану проведения эксперимента выполняются расчеты выбранных от-

кликов [13]. При выборе плана вычислительного эксперимента учитывалась необходимость получения адекватного математического описания рассматриваемой зависимости и по возможности сокращение числа вычислений.

Для описания поверхности отклика  $Y=f(X_1, \dots, X_n)$  проводится многофакторный вычислительный эксперимент по плану второго порядка. При этом используется план *Box-Behnken design*, показавший достаточно высокую эффективность по основным статистическим критериям. Эксперимент проводится в программной среде «STATISTICA Advanced» [18], рассчитываются коэффициенты регрессионного уравнения и значимость коэффициентов модели. План эксперимента сводится в таблицу.

Для описания искомой зависимости строится модель в виде полинома [19]:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i X_i \quad (1)$$

После оценки значимости параметров, незначимые параметры исключаются из модели.

На основе анализа полученного уравнения регрессии интерпретируется влияние выбранных факторов на коэффициент аккумуляции рассматриваемого здания. Наглядно вклад каждого фактора в изменение коэффициента тепловой аккумуляции  $\beta$  для зданий типа 111-90 представлен в графическом виде на рисунке 2.

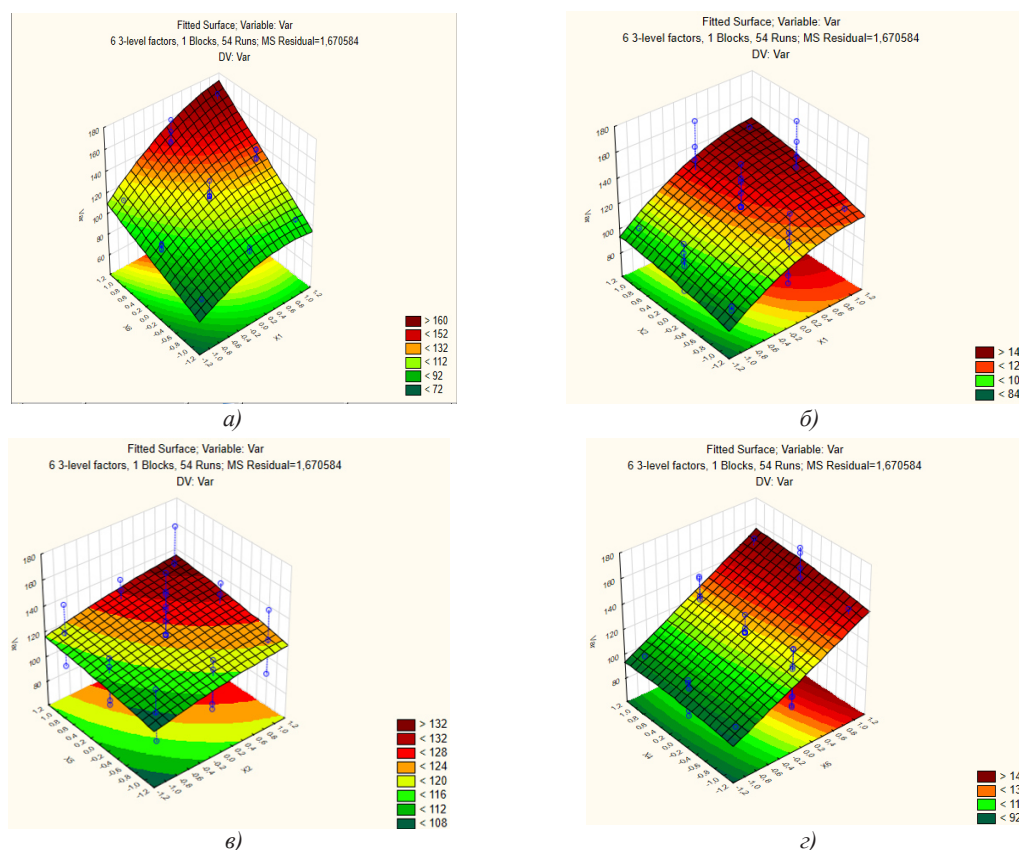


Рисунок 2 – Коэффициент тепловой аккумуляции рассматриваемого здания в зависимости от:

- а) толщины дополнительного теплоизоляционного слоя наружной стены и кратности воздухообмена;
- б) толщины дополнительного теплоизоляционного слоя наружной стены и сопротивления теплопередаче вновь устанавливаемых оконных заполнений; в) сопротивления теплопередаче вновь устанавливаемых оконных и балконных заполнений; г) толщины слоя дополнительной теплоизоляции цокольного перекрытия и кратности воздухообмена.

Из графиков (рис. 2) видно, что проведение инженерно-технических мероприятий, направленных на повышение защищенности населения в зданиях при ЧС, позволяет достичь «нормального» уровня защиты рассматриваемого здания при проведении данных мероприятий в комплексе.

Также видны отличия в форме изолиний на различных графиках, что позволяет говорить о разнице в силе влияния этих факторов на коэффициент аккумуляции и об их вкладе в структуру тепловпотерь при отключении теплоснабжения [20].

Определение объема мероприятий по изменению выбранных параметров конструктивных жилком здания можно получить на основе решения задачи оптимизации [2]. При этом рассматривается параметрическое множество, где начальное состояние объекта исследования, многоквартирного жилого дома, описывается вектором состояния [21]:

$$X_i = (\delta_p, c_p, \rho_p, F_p, \lambda_p, G_p, R_p)^T \quad (2)$$

```
> # objective function
> beta <- function(x) {
+   ( a0 + a1*x[1] + a3*x[3] + a4*x[4] ) / ( b0 + (b1/x[1]) + (b2/x[2]) + (b3/x[3]) + (b4/x[4]) + (b5/x[5]) )
+ }
>
> # lower and upper bounds
> lb <- c(0, 0.32, 0, 0, 0.18)
> ub <- c(0.2, 0.95, 0.2, 0.1, 0.54)
>
> # inequality constraints
> constr <- function(x) {
+   constr <- -5 + c1*x[1] + c2*x[2] + c3*x[3] + c4*x[4] + c5*x[5]
+   return(constr)
+ }
>
> # initial values
> x0 <- c(0.05, 0.4, 0.05, 0.05, 0.5)
>
> # define options
> opts <- list(
+   "algorithm" = "NLOPT_GN_ISRES",
+   "xtol_rel" = 1.0e-15,
+   "maxeval" = 1000000, # iterations
+   "tol_constraints_ineq" = 1.0e-10
+ )
>
> # perform the optimization
> res <- nloptr(
+   x0 = x0,
+   eval_f = function(x) -beta(x),
+   lb = lb,
+   ub = ub,
+   eval_g_ineq = constr,
+   opts = opts
+ )
> #res
> sol <- res[['solution']]
>
> paste0('нижний порог переменных: ', 'x1 >= ', lb[1], ' ; x2 >= ', lb[2], ' ; x3 >= ', lb[3], ' ; x4 >= ', lb[4], ' ; x5 >= ', lb[5])
[1] "нижний порог переменных: x1 >= 0; x2 >= 0.32; x3 >= 0; x4 >= 0; x5 >= 0.18"
> paste0('Верхний порог переменных: ', 'x1 <= ', ub[1], ' ; x2 <= ', ub[2], ' ; x3 <= ', ub[3], ' ; x4 <= ', ub[4], ' ; x5 <= ', ub[5])
[1] "Верхний порог переменных: x1 <= 0.2; x2 <= 0.95; x3 <= 0.2; x4 <= 0.1; x5 <= 0.54"
> paste0('Оптимальное решение: ', 'x1 = ', sol[1], ' ; x2 = ', sol[2], ' ; x3 = ', sol[3], ' ; x4 = ', sol[4], ' ; x5 = ', sol[5])
[1] "Оптимальное решение: x1 = 0.199999999999998; x2 = 0.949999999999992; x3 = 0.2; x4 = 0.0999999999999996; x5 = 0.5399999999999985"
> paste0('Коэффициент тепловой аккумуляции: ', beta(sol))
[1] "Коэффициент тепловой аккумуляции: 42.4729036242485"
> paste0('Затраченный ресурс: ', c1*sol[1] + c2*sol[2] + c3*sol[3] + c4*sol[4] + c5*sol[5])
[1] "Затраченный ресурс: 3449310.99999982"
> |
```

Рисунок 3 – Код программы для расчета значений целевой функции

**Заключение.** Таким образом, на основе теоретических, экспериментальных данных и математического моделирования разработана и предложена методика определения объема мероприятий по повышению защищенности населения в здании при чрезвычайной ситуации, связанной с нарушением теплоснабжения, которая позволяет решить следующие задачи:

Вводится целевая функция, то есть максимизируется показатель защищенности населения в здании:

$$W(X, \tau) = u(\tau) = Z \rightarrow \max \quad (3)$$

На параметры состояния накладываются линейные ограничения, поскольку физические параметры имеют границы [8]:

$$\begin{cases} Ax \leq b; x \geq 0 \\ A_1 \leq \delta \leq A_2 \\ B_1 \leq c \leq B_2 \\ C_1 \leq \rho \leq C_2 \\ D_1 \leq F \leq D_2 \\ E_1 \leq \lambda \leq E_2 \\ H_1 \leq G \leq H_2 \\ I_1 \leq R \leq I_2 \end{cases} \quad (4)$$

В итоге получается задача оптимизации функции многих переменных с линейными ограничениями, которая решается методом проекции градиента [11].

Для вычисления значений функции разработана программа на языке R, фрагмент кода представлен на рисунке 3 [6].

1. Управлять мероприятиями, влияющими на показатель защищенности населения в здании, при ограниченных ресурсах на их реализацию.

2. Определить искомый объем каждого мероприятия по повышению защищенности населения в здании при чрезвычайной ситуации, связанной с нарушением теплоснабжения, при проведении реконструкции и



модернизации здания на основе решения оптимизационной задачи.

3. Подготовить рекомендации для органов управления и сил РСЧС по повышению защищенности населения в здании при чрезвычайной ситуации, связанной с нарушением теплоснабжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Алексеевич Г.А., Григорьевич К.Р. Статистическая оценка некоторых факторов надежности и безопасности систем централизованного теплоснабжения // Academia. Архитектура и строительство. 2012. № 3. С. 111–114.
2. Бейко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации / И.В. Бейко, Б.Н. Бублик, П.Н. Зинько, Киев: Вища шк, 1983. 511 с.
3. Геккель И.Я. [и др.]. Общая Постановка Задачи Обоснования Рациональных Параметров Системы Защищенности Населения В Жилом Здании От Неблагоприятных Факторов Чрезвычайных Ситуаций, Связанных С Отключением Теплоснабжения // Научные И Образовательные Проблемы Гражданской Защиты. 2020. № 3 (46).
4. Геккель И.Я. О влиянии конструктивных характеристик жилых зданий на обеспечение защиты населения при чрезвычайных ситуациях, связанных с нарушением теплоснабжения // Проблемы Техносферной Безопасности: Материалы Международной Научно-Практической Конференции Молодых Ученых И Специалистов. 2019. № 8.
5. Езерский В.А., Монастырев П.В., Клычников Р.Ю. Технико-экономическая оценка термомодернизации жилых зданий / В. А. Езерский, П. В. Монастырев, Р. Ю. Клычников, Изд-во Ассоц. строительных вузов.
6. Золотарюк А.В. Язык и среда программирования R / А. В. Золотарюк, Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М».
7. Козлов В.В. Основы оптимизации теплозащиты ограждающих конструкций по окупаемости энергосберегающих мероприятий // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 10–13.
8. Рыбаков А.В. [и др.]. О Подходе К Определению Показателя Защищенности Зданий И Сооружений Опасного Производственного Объекта // Научные И Образовательные Проблемы Гражданской Защиты. 2017. № 2 (33).
9. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов, МЭИ.
10. Стенников В.А., Славин Г.Б. Энергетическая Безопасность В Теплоснабжении России // Энергетическая Политика. 2009. № 6.
11. Черняев Ю.А. Обобщение метода проекции градиента и метода Ньютона на экстремальные задачи с ограничением в виде гладкой поверхности // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. № 9 (55). С. 1493–1502.
12. Горелов М.В., Гужов С.В., Горячева Е.М., Юркина М.Ю. Экспериментальное определение времени остывания здания при аварийном отключении системы теплоснабжения // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 4. С. 11–15.
13. Дисперсионный анализ экспериментальных данных — Образовательная платформа «Юрайт». Для вузов и ссузов. [Электронный ресурс]. URL: <https://urait.ru/book/dispersionnyy-analiz-eksperimentalnyh-dannyh-495700> (дата обращения: 03.02.2022).
14. Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Сучков В.И. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом. М.: Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО», 2001. 43с.
15. СП 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха СНиП 41-01-2003 (с Поправкой) от 30 декабря 2020 - docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573697256?marker=7D20K3> (дата обращения: 03.02.2022).
16. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (с Изменением N 1) от 30 июня 2012 - docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095525> (дата обращения: 04.02.2022).
17. СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий от 26 марта 2004 - docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200037434> (дата обращения: 07.02.2022).
18. STATISTICA Advanced [Электронный ресурс]. URL: [http://statsoft.ru/products/STATISTICA\\_Advanced/](http://statsoft.ru/products/STATISTICA_Advanced/) (дата обращения: 03.02.2022).
19. Теория вероятностей и математическая статистика — Образовательная платформа «Юрайт». Для вузов и ссузов. [Электронный ресурс]. URL: <https://urait.ru/book/teoriya-veroyatnostey-i-matematicheskaya-statistika-456395> (дата обращения: 03.02.2022).
20. Методы оптимизации. Практический курс: учебное пособие с мультимедиа сопровождением / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. — М.: Логос, 2011. — 424 с: ил.
21. Воскобоев В. Ф. Модели организаций жизнеобеспечения населения // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2017. № 4 (35). С. 73–77.

Статья поступила в редакцию 11.02.2022

Статья принята к публикации 10.03.2022