

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Низина Т.А., д-р техн. наук, проф.,  
Селяев В.П., академик РААСН, д-р техн. наук, проф.,  
Инин А.Е., аспирант  
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ С УЧЕТОМ КОЛИЧЕСТВА СЛОЕВ И ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ

nizinata@yandex.ru

В статье приведены результаты экспериментальных исследований коэффициента теплопроводности жидких теплоизоляционных покрытий, а также определено влияние количества слоев покрытия на плотность теплового потока и термическое сопротивление образцов жидкого теплоизоляционного покрытия. Теплоизоляционные показатели жидкого теплоизоляционного покрытия определены на плоском трехслойном образце с помощью прибора ИТС-1. В ходе проведенных исследований получены зависимости изменения плотности теплового потока, термического сопротивления и коэффициента теплопроводности в зависимости от толщины слоя ЖТП. Установлено, что наименьший разброс показателей наблюдается для покрытий толщиной 3÷6 мм.

**Ключевые слова:** жидкое теплоизоляционное покрытие, плотность теплового потока, термическое сопротивление, коэффициент теплопроводности, тепловая защита.

Проблема рационального использования энергетических ресурсов в последнее десятилетие стала актуальной для всего мира. Энергетика является основой экономической безопасности нашей страны, так как именно она формирует и определяет возможности развития экономики, конкурентоспособность производимой продукции и эффективность производства [1].

Наша страна является одним из мировых лидеров по производству и потреблению тепловой энергии на обогрев зданий и сооружений, уступая при этом в 2÷3 раза по показателям удельного потребления тепловой энергии на отопление, отнесенным к единице площади, странам, расположенным в той же климатической зоне (Канада, страны Скандинавии). При этом мы несем огромные потери энергетических ресурсов: до 70 % на отоплении зданий и до 40 % при транспортировке [2].

Один из путей снижения тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий, сооружений, тепловых сетей и промышленного оборудования заключается в применении эффективных теплоизоляционных материалов. На сегодняшний день рынок теплоизоляционных материалов представлен широким выбором продукции, основная доля которого приходится на изделия из минеральной ваты (60÷70 %).

Сравнительно недавно на отечественном рынке стали появляться жидкие теплоизоляционные покрытия (ЖТП) для теплоизоляции фа-

садов зданий и инженерных коммуникаций. ЖТП представляют собой суспензию полимерного связующего, функциональных добавок, пигментов и тонкодисперсных порошков с низким значением коэффициента теплопроводности. К несомненным достоинствам ЖТП следует отнести: экологичность; пожаробезопасность; стойкость к атмосферным воздействиям; постоянный доступ к осмотру изолированной поверхности; удобство ремонта и монтажа [3].

Производители подобных составов заявляют сверхнизкие значения коэффициента теплопроводности (0,001÷0,0015 Вт/(м·К)), объясняя их уникальные теплоизоляционные свойства наличием в составе связующего вакуумированных микросфер с коэффициентом теплопроводности 0,00083 Вт/(м·К) [4]. Так же приводятся данные о том, что 1 мм такого покрытия по теплозащитным характеристикам соответствует 50 мм минеральной ваты [5]. Достоверность подобных заявлений о сверхнизких значениях коэффициента теплопроводности ЖТП оспаривается специалистами в области теплотехники.

К настоящему времени теплоизоляционные свойства ЖТП изучены не достаточно полно. Имеющиеся исследования теплоизоляционных характеристик подобных составов, проведенные различными авторами, часто показывают значительное расхождение в результатах измерения [6]. Неправильный расчет теплоизоляционных показателей строительных материалов может

привести к увеличению потерь тепловой энергии на теплоизолируемых объектах, а в ряде случаев – к выходу из строя инженерного оборудования.

Известен способ определения коэффициента теплопроводности ЖТП с помощью «вспомогательной стенки» [6], включающей два слоя материала, размещаемые на источнике тепла, один из которых с известным коэффициентом теплопроводности, а у второго коэффициент теплопроводности определяется по формуле:

$$\lambda_2 = \delta_2 \frac{\lambda_1 t_T - t_1}{\delta_1 t_1 - t_2} \quad (1)$$

где  $\delta_1$  и  $\lambda_1$  – толщина и коэффициент теплопроводности материала с известным коэффициентом теплопроводности;  $t_T$  – температура источника тепла;  $t_1$  – температура между слоями стенки;  $t_2$  – температура наружной поверхности второго слоя;  $\delta_2$  – толщина слоя, коэффициент теплопроводности которого определяется.

Применять данный метод для определения коэффициента теплопроводности жидких теплоизоляционных покрытий возможно при известной теплопроводности одного из слоев, что не всегда возможно.

Также существует метод определения коэффициента теплопроводности жидких теплоизоляционных покрытий [7], сущность которого заключается в использовании многослойной плоскопараллельной стенки, состоящей из двух слоев материала, установленных на источник тепла, измерении температуры источника тепла, температур между двумя слоями материала и наружной поверхности. Коэффициент теплопроводности  $\lambda_u$  предлагается определять по формуле:

$$\lambda_u = \delta_u \frac{\lambda}{\delta} \left(1 - \frac{t_n}{t_u}\right) \quad (2)$$

где  $\delta_u$  – толщина жидкого теплоизоляционного покрытия;  $\delta$  – толщина слоя материала;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $t_n$  – температура неизолированной наружной поверхности верхнего слоя;  $t_u$  – температура в контактной поверхности верхнего слоя материала и металлической пластины с теплоизоляцией.

В работе [8] предлагается использовать для определения коэффициента теплопроводности образцы цилиндрической формы, что позволяет создать существенный перепад между температурами стенки и окружающей среды, поскольку в слое теплоизоляции на криволинейных поверхностях характер распределения температуры в слое не является линейным. Коэффициент теплопроводности образца теплоизоляции цилиндрической формы  $\lambda$  находят по формуле:

$$\lambda = q \frac{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{(T_1 - T_2)} \quad (3)$$

где  $q$  – плотность теплового потока;  $r_1$  – радиус наружной поверхности слоя теплоизоляции;  $r_2$  – радиус внутренней поверхности слоя теплоизоляции;  $T_1$  – температура наружной поверхности слоя теплоизоляции;  $T_2$  – температура внутренней поверхности слоя теплоизоляции.

Несомненно, что при проведении исследований целесообразно использовать ГОСТовские средства испытаний, что позволяет получать надежную, воспроизводимую оценку изучаемых характеристик. При оценке теплопроводности и теплового сопротивления достаточно часто используют прибор «ИТС-1», позволяющий оценивать данные показатели с помощью метода стационарного теплового потока в соответствии с ГОСТ 7076-99.

Сущность метода заключается в создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к лицевым (наибольшим) граням образца, измерении плотности этого теплового потока, температуры противоположных лицевых граней и толщины образца.

Согласно ГОСТ 7076-99, эффективная теплопроводность (коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)) материала определяется по формуле:

$$\lambda_{eff} = \frac{d}{R}, \quad (4)$$

где  $d$  – толщина образца, м;  $R$  – термическое сопротивление, м<sup>2</sup>·К/Вт.

Термическое сопротивление вычисляется как:

$$R = \frac{\Delta T}{q}, \quad (5)$$

где  $\Delta T$  – разность температур между противоположными гранями образца, К;  $q$  – плотность стационарного теплового потока, проходящего через образец, Вт/м<sup>2</sup>.

Для измерения теплопроводности сыпучего материала в ГОСТ предлагается размещать его в ящике, дно и крышка которого изготовлены из тонкого листового материала. При этом его термическое сопротивление  $R_u$  и эффективную теплопроводность  $\lambda_{effu}$  определяют по формулам:

$$R_u = \frac{\Delta T}{q_u} - 2R_L; \quad (6)$$

$$\lambda_{effu} = \frac{d_u}{\frac{\Delta T_u}{q_u} - 2R_L}, \quad (7)$$

где  $R_L$  – термическое сопротивление листового материала, из которого изготовлены дно и крышка ящика,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

Технические характеристики измерителя теплопроводности «ИТС-1»:

- диапазон измерения теплопроводности –  $0,02 \div 1,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;
- диапазон измерения теплового сопротивления –  $0,01 \div 1,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;
- пределы допускаемой относительной погрешности измерений теплопроводности и теплового сопротивления –  $\pm 5 \%$ ;
- время измерения –  $0,5 \div 2,5$  часа;
- рекомендуемая толщина измеряемого образца (согласно паспорту) –  $10 \div 25$  мм, возможно снижение до 5 мм;
- размер поперечного сечения –  $150 \times 150$  мм.

Из приведенного выше перечня видно, что толщина образца при использовании данного прибора не может быть меньше 5 мм. При этом существует необходимость определения коэффициента теплопроводности покрытий и меньшей толщины, что требует разработки методики подобных исследований.

В работе [9] предлагается методика, основанная на определении коэффициента теплопроводности плоского трехслойного образца, состоящего из двух одинаковых эталонов 1 определенной толщины  $\delta$  и расположенного между

ними слоя жидкой теплоизоляции толщиной  $\delta_{\text{ЖТП}}$ . При прохождении стационарного теплового потока через плоский трехслойный образец с помощью измерителя «ИТС-1» определяют эквивалентный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{ЭКВ}}$ . Коэффициент теплопроводности ЖТП определяют по формуле [9]:

$$\lambda_{\text{ЖТП}} = \frac{\delta_{\text{ЖТП}}}{\frac{2\delta + \delta_{\text{ЖТП}}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} - 2\delta}, \quad (8)$$

где  $\lambda_{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности трехслойного образца;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности эталонов;  $\delta$  – толщина одного эталона;  $\delta_{\text{ЖТП}}$  – толщина слоя жидкой теплоизоляции.

Воспользуемся предложенной методикой для определения теплофизических показателей ЖТП различной толщины. Для определения влияния числа слоев и толщины покрытия на коэффициент теплопроводности на стекло размером  $150 \times 150$  мм и толщиной 3 мм было нанесено последовательно 6 слоев теплоизоляционного покрытия толщиной около 1 мм с промежуточной сушкой в течение 24 часов. На каждом этапе с помощью прибора «ИТС-1» определялись эквивалентные показатели: плотность теплового потока, термическое сопротивление и коэффициент теплопроводности трехслойных образцов. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Измерение теплофизических показателей трехслойных образцов в зависимости от числа слоев и толщины жидкого теплоизоляционного покрытия**

Номер слоя	Толщина нанесенных слоев, мм	Эквивалентная плотность теплового потока $q_{\text{ЭКВ}}$ , $\text{Вт}/\text{м}^2$	Эквивалентное термическое сопротивление $R_{\text{ЭКВ}}$ , $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ЭКВ}}$ , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .	Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ЖТП}}$ , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .
1	1,01	0,043	142,4	0,163	0,0358
2	1,99	0,049	125,9	0,163	0,0581
3	2,94	0,060	118,7	0,149	0,0651
4	4,08	0,072	114,0	0,140	0,0713
5	4,87	0,083	106,6	0,131	0,0714
6	5,98	0,096	104,0	0,125	0,0739

Из анализа полученных данных установлено (рис. 1–3), что эквивалентная плотность теплового потока трехслойных плоских образцов в зависимости от толщины теплоизоляционного слоя описывается логарифмической зависимостью:

$$q_{\text{ЭКВ}} = 141,94 - 21,36 \cdot \ln(\delta_{\text{ЖТП}}); \quad (9)$$

эквивалентных показателей термического сопротивления и коэффициента теплопроводности – линейными уравнениями:

$$R_{\text{ЭКВ}} = 0,0292 + 0,0109 \cdot \delta_{\text{ЖТП}}, \quad (10)$$

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = 0,1747 - 0,0085 \cdot \delta_{\text{ЖТП}}. \quad (11)$$

Для определения коэффициента теплопроводности ЖТП воспользуемся формулой (8). Плотность теплового потока, термическое сопротивление и коэффициент теплопроводности 2 стеклянных образцов суммарной толщиной 6 мм, соответственно, составили:  $230,7 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ,  $0,0148 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  и  $0,4053 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Результаты расчета представлены в таблице 1 и на рис. 4.

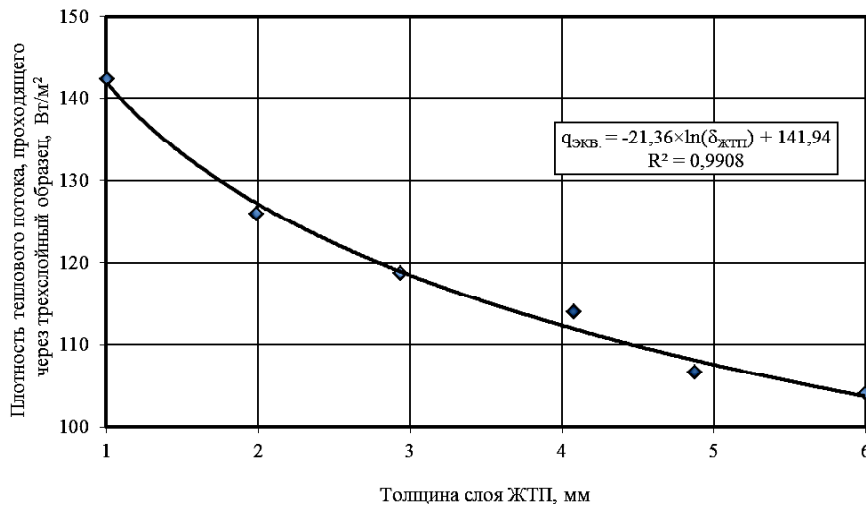


Рис. 1. Изменение эквивалентной плотности теплового потока, проходящего через трехслойный образец в зависимости от толщины слоя ЖТП

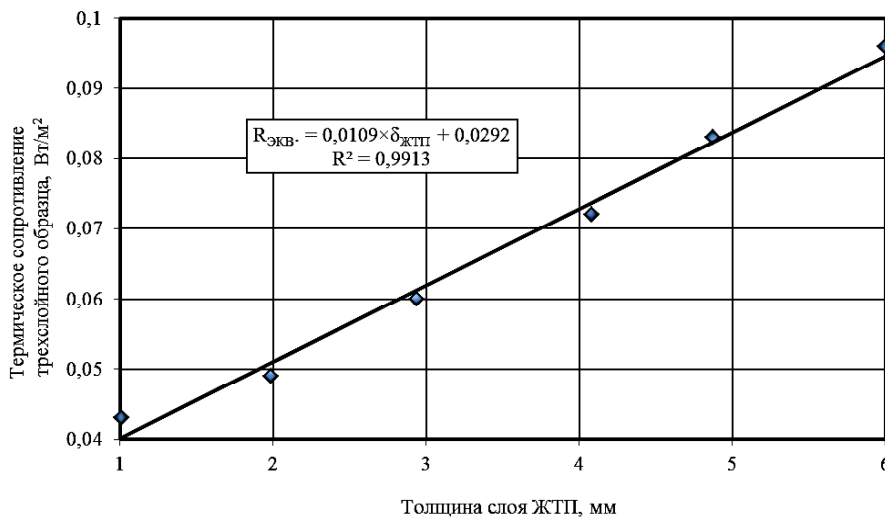


Рис. 2. Изменение эквивалентного термического сопротивления трехслойного образца в зависимости от толщины слоя ЖТП

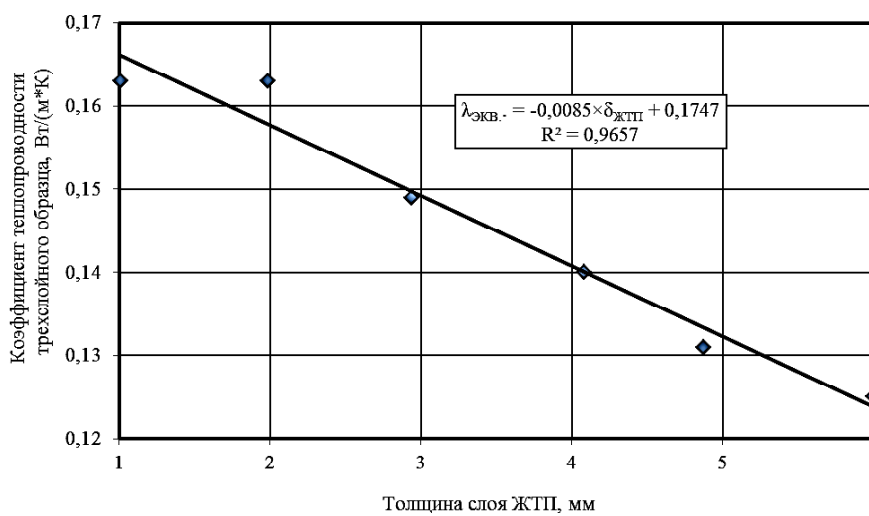


Рис. 3. Изменение эквивалентного коэффициента теплопроводности трехслойного образца в зависимости от толщины слоя ЖТП

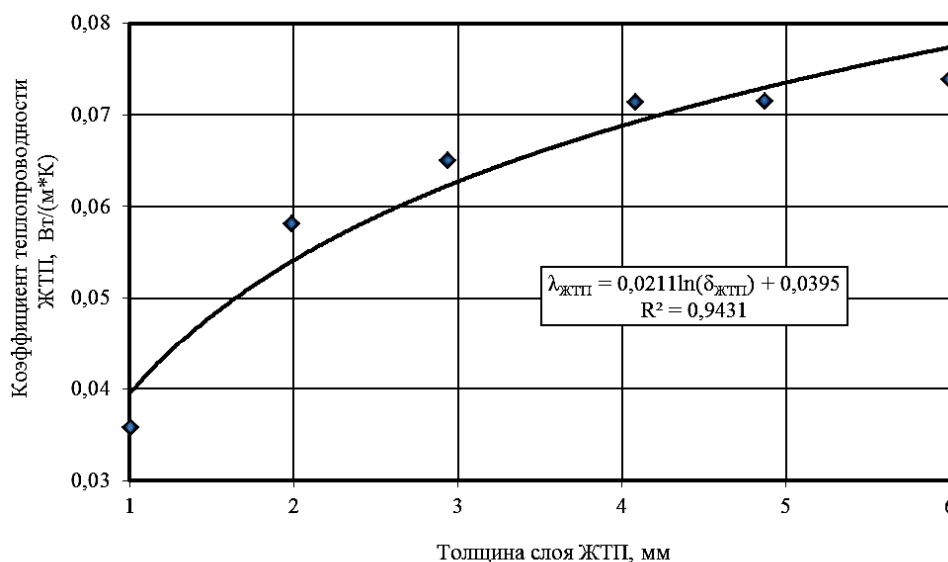


Рис. 4. Изменение коэффициента теплопроводности жидкой теплоизоляции в зависимости от толщины покрытия

Установлено, что при увеличении толщины покрытия в интервале от 1 до 6 мм наблюдается повышение данного показателя от 0,0358 до 0,0739 Вт/(м·К). Наибольшее изменение  $\lambda_{\text{ЖТП}}$  при увеличении толщины покрытия зафиксировано на интервале 1÷2 мм со стабилизацией показателя для покрытий толщиной 4÷6 мм. Коэффициент вариации данного показателя на всем исследуемом интервале составляет 22,9 %; сужение исследуемого интервала толщин покрытия приводит к его значительному уменьшению: 9,43 % – для 2÷6 мм; 5,363 % – для 3÷6 мм; 2,01 % – для 4÷6 мм; 2,37 % – для 5÷6 мм.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения данной методики, основанной на использовании измерителя теплопроводности «ИТС-1» для оценки теплофизических показателей тонких теплоизоляционных покрытий. Для получения наиболее стабильных показателей целесообразно проведение исследований теплоизоляционных покрытий толщиной 3÷6 мм.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бородин М. И. Экономическая безопасность: энергетическая составляющая // Вестник ТГУ. 2010. № 1. С. 33–36.
2. Баталин Б. С., Евсеев Л. Д. Пенополистирол: низвержение мифа // Материалы и технологии. 2010. № 9. С. 13–15
3. Низина Т.А., Инин А. Е. Энергоэффективные жидкие теплоизоляционные покрытия на

основе полых микросфер и тонкодисперсных минеральных наполнителей // Региональная архитектура и строительство, 2015. №4. С. 33–42.

4. Принцип действия RE-THERM. Режим доступа: <http://re-therm.ru/how-it-works> (дата обращения: 25.04.2016).

5. Теплоизоляционные покрытия RE-THERM. Режим доступа: <http://re-therm.ru/coatings-retherm> (дата обращения: 25.04.2016).

6. Анисимов М. В., Рекунов В. С. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. № 9. С. 15–22.

7. Манешев И. О., Правник Ю. И., Садыков Р. А., Сафин И. А. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности и эффективности сверхтонких теплоизоляционных покрытий // Известия КГАСУ. 2013. №1. С. 135–142.

8. Хабибуллин Ю. Х., Барышева О. Б. Разработка теплоизолирующих покрытий и методики определения их теплофизических свойств // Известия КГАСУ. 2015. №3. С. 245–249.

9. Павлов М. В., Карпов Д. Ф., Сеницын А. А., Мнушкин Н. В. Определение коэффициента теплопроводности жидкой тепловой изоляции в лабораторных условиях // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. №37. С. 79–86.

---

**Nizina T.A., Selyaev V.P., Inin A.E.****EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE COEFFICIENT THERMAL CONDUCTIVITY OF LIQUID INSULATION WITH CONSIDERATION THE NUMBER OF LAYERS AND THICKNESS OF COATINGS**

*The article presents the results of experimental studies of coefficient of thermal conductivity of liquid heat-insulating coatings, as well as the determined influence of the number coating layers on the heat flux density and thermal resistance of samples of liquid heat-insulating coating. Thermal insulation performance of liquid heat-insulating coatings is determined on a flat three-layer sample using the device of ITS-1. During the conducted researches received of dependence of change the density of heat flow, thermal resistance and coefficient of thermal conductivity depending on the thickness of the layer liquid heat-insulating coating. Established that the lowest the spread of performance is observed for coatings with thickness of 3÷6 mm.*

**Key words:** liquid heat insulation coating, heat flow density, thermal resistance, coefficient of thermal conductivity, thermal protection.

---

**Низина Татьяна Анатольевна**, доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Адрес: Россия, 430005, г. Саранск, ул. Советская, 24. E-mail: nizinata@yandex.ru

**Селяев Владимир Павлович**, доктор технических наук, профессор зав. кафедрой строительных конструкций. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Адрес: Россия, 430005, г. Саранск, ул. Советская, 24. E-mail: ntorm80@mail.ru

**Инин Андрей Евгеньевич**, аспирант кафедры строительных конструкций. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Адрес: Россия, 430005, г. Саранск, ул. Советская, 24. E-mail: sucre90@mail.ru