

Оригинальная статья

УДК 629.463.12:629.4.016.15

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-99-108>EDN: <https://elibrary.ru/mpvfgh>

Виртуальный стенд для определения тепловых характеристик вакуумных теплоизоляционных панелей

А. Н. Балалаев✉, М. А. Паренюк

Самарский государственный университет путей сообщения,
Самара, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены результаты экспериментального исследования теплоизоляционных характеристик вакуумных панелей с использованием цифровой копии стенда. Объектом исследования является вакуумная теплоизоляционная панель, образованная в виде герметичного корпуса в форме параллелепипеда с ребрами жесткости внутри. При пониженном давлении воздуха внутри корпуса удельное тепловое сопротивление таких вакуумных теплоизоляционных панелей становится больше удельного теплового сопротивления современных теплоизоляционных материалов. При использовании таких панелей в качестве теплоизоляции наземных транспортных средств, в частности пассажирских и рефрижераторных железнодорожных вагонов, можно достичь значительного снижения затрат энергии на отопление или кондиционирование внутреннего помещения. Экспериментальное определение тепловых характеристик вакуумных теплоизоляционных панелей из-за их существенной неоднородности сопряжено со значительными затратами времени и использованием дорогостоящего оборудования. Цель исследования заключается в разработке способа определения теплового сопротивления теплоизоляционных материалов с внутренней неоднородностью за минимальное время с приемлемой точностью.

Материалы и методы. Методы исследования сочетают физический эксперимент над тремя опытными образцами вакуумной теплоизоляции и численный эксперимент над 3D-моделями этих образцов. В частности, для тарирования экспериментального стенда использовался его цифровой аналог — виртуальный стенд, выполненный в виде 3D-модели в программе SolidWorks.

Результаты. Исследование нестационарного теплового процесса на модели стенда в SolidWorks Simulation позволило сократить время физического эксперимента до 40 мин и установить значения эффективного коэффициента теплопроводности трех опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей.

Обсуждение и заключение. Исследование стационарного теплового процесса 3D-моделей опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей в программе SolidWorks Simulation показало, что расхождение между опытными и расчетными значениями эффективного коэффициента теплопроводности составляет менее 5 %. Предлагаемый метод определения эффективного коэффициента теплопроводности материалов может использоваться при входном и выходном контроле теплоизоляции пассажирского вагона во время капитального ремонта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажирские вагоны, изотермические вагоны, вакуумные теплоизоляционные панели, коэффициент теплопроводности, виртуальный стенд, нестационарный тепловой процесс

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Балалаев А. Н., Паренюк М. А. Виртуальный стенд для определения тепловых характеристик вакуумных теплоизоляционных панелей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 99–108. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-99-108>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.463.12:629.4.016.15

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-99-108>

EDN: <https://elibrary.ru/mpvfgh>



Virtual test bench for the determination of the thermal properties of vacuum insulation panels

Anatoly N. Balalaev✉, Maria A. Parenjuk

Samara State Transport University,
Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors present the results of an experimental study of the thermal insulation properties of vacuum panels using a digital copy of the test bench. The subject of the study is a vacuum insulation panel in the form of a sealed parallelepiped with internal stiffeners. When the air pressure inside the body is reduced, the specific thermal resistance of such vacuum insulation panels becomes higher than that of modern insulation materials. The use of such panels as thermal insulation for land means of transport, particularly passenger carriages and refrigerator wagons, significantly reduces energy costs for heating or air conditioning the interior. Experimental determination of the thermal properties of vacuum insulation panels is time consuming and requires expensive equipment due to their considerable heterogeneity. The aim of the study is to develop a method for determining the thermal resistance of insulating materials with internal heterogeneity in the shortest possible time with acceptable accuracy.

Materials and methods. The research methods combine physical experiments on three vacuum insulation panel prototypes and numerical experiments on 3D models of these samples. Specifically, the test stand was calibrated using its digital counterpart — a virtual test bench created as a 3D model using SolidWorks software.

Results. The study of the transient thermal process on the stand model in SolidWorks Simulation allowed us to reduce the time of the physical experiment to 40 minutes and to determine the values of the effective thermal conductivity coefficient of the three vacuum insulation panel prototypes.

Discussion and conclusion. The study of the steady-state thermal process of 3D models of vacuum insulation panel prototypes in SolidWorks Simulation showed that the discrepancy between the experimental and calculated values of the effective thermal conductivity coefficient is less than 5%. The proposed method for determining the effective thermal conductivity coefficient of materials is suitable for use in the incoming and outgoing inspection of car insulation during overhaul.

KEYWORDS: passenger carriage, refrigerator vans, vacuum insulation panels, thermal conductivity coefficient, virtual test bench, transient thermal process

FOR CITATION: Balalaev A. N., Parenjuk M. A. Virtual test bench for the determination of the thermal properties of vacuum insulation panels. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):99-108. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-99-108>.

✉ wagon.samgaps@mail.ru (A. N. Balalaev)

Введение. Наземные транспортные средства, например пассажирские или изотермические железнодорожные вагоны, в условиях эксплуатации Российской Федерации должны иметь в конструкции стенок кузова теплоизоляционные материалы с максимально большим тепловым сопротивлением. Современные теплоизоляционные материалы, используемые в конструкции стенок кузовов пассажирских вагонов, обеспечивают величину коэффициента теплопередачи не более $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [1]. Увеличение удельного теплового сопротивления стенок кузова приводит к снижению затрат энергии на отопление железнодорожного вагона в зимнее время и на кондиционирование в летнее время года. Однако при этом возрастает толщина теплоизоляции, что увеличивает стоимость изготовления кузова железнодорожного вагона и уменьшает его полезный объем.

Для увеличения удельного теплового сопротивления стенок кузова пассажирских и изотермических железнодорожных вагонов в [2] предложено использовать вакуумные теплоизоляционные панели сотовой структуры [3]. Вакуумная теплоизоляционная панель представляет собой герметичную конструкцию из двух пластин, между которыми расположены ребра жесткости сотовой структуры. При создании внутри панели вакуума с остаточным давлением менее 3 кПа, согласно расчетам, удельное тепловое сопротивление таких вакуумных теплоизоляционных панелей становится больше удельного теплового сопротивления современных теплоизоляционных материалов [2]. Однако экспериментальное определение удельного теплового сопротивления таких панелей вызывает значительные трудности из-за длительного времени достижения стационарного теплового режима, на котором проводятся исследования теплоизоляционных свойств материалов с использованием различных методов, рекомендуемых в британских, европейских и американских стандартах определения теплоизоляционных свойств: метода огражденного нагретого ящика [4], метода измерения теплового потока [5], метода калиброванного нагретого ящика [6–10]. В ряде работ показаны недостатки этих методов, заключающиеся в длительности выхода на стационарный режим [11–15]. Более быстрые методы, например обратный метод, требуют использования сложной и дорогостоящей аппаратуры, например инфракрасного термографа [16]. Проблемы определения теплоизоляционных свойств вакуумной теплоизоляции и пути решения этих проблем представлены в работах [17, 18], где использовался метод нагретого ящика и инфракрасный термограф. Согласно [18] выход на стационарный тепловой режим в исследованиях вакуумной теплоизоляции толщиной 15 мм наблюдался через 110–130 мин. При увеличении толщины вакуумной

теплоизоляции можно ожидать увеличения времени выхода на стационарный режим, поэтому более удобным и экономичным по времени проведения эксперимента и типу используемого оборудования является метод регулярного режима, известный с середины прошлого века [19, 20]. Выход на этот режим характеризуется постоянством темпа охлаждения нагретого объекта измерения. Более быстрым методом является экспресс-метод нерегулярного теплового режима, в котором также отмечалось постоянство темпа нагрева [21]. Применение метода эталонов для экспериментального определения удельного теплового сопротивления вакуумной теплоизоляционной панели на режиме постоянного темпа нагрева при постоянной тепловой нагрузке описано в работе [22]. В данном методе от одного источника тепла при постоянной тепловой нагрузке нагревались два эталонных объекта с известной теплопроводностью, один из которых был огражден от атмосферного воздуха слоем теплоизоляции с известными теплоизоляционными свойствами, а другой — исследуемой вакуумной панелью. По разности темпов нагрева двух эталонных объектов определялась величина удельного теплового сопротивления вакуумной панели из экспериментальной зависимости между этими величинами, полученными при замене вакуумной панели на эталонные образцы теплоизоляции с такими же размерами, но разной величиной коэффициента теплопроводности. Недостатком данного метода является сложность подбора эталонных образцов теплоизоляции с нужными свойствами, обеспечивающими подобие тепловых процессов.

Целью настоящего исследования является модернизация метода эталонов [22], заключающаяся в использовании вместо экспериментальной зависимости удельного теплового сопротивления от разности темпов нагрева двух эталонных объектов аналогичной расчетной зависимости, полученной на виртуальном стенде в программе SolidWorks Simulation.

Материалы и методы. Для экспериментального определения удельного теплового сопротивления вакуумной теплоизоляционной панели был разработан стенд, показанный на рис. 1.

Источник постоянного тока $\mathcal{Z}$ служит для передачи электрической мощности нагревателю I , который нагревает первый 7 и второй 3 эталонные объекты, представляющие собой пластины из алюминиевого сплава 1060 толщиной 3 мм и размещенные с двух сторон нагревателя. В эталонных объектах выполнены пропилы глубиной 2 мм, в которые помещены термодатчики 4 и 6 с толщиной спаев 1 мм. Спаи термодатчиков расположены в геометрических центрах эталонных объектов. Температура эталонных объектов 3 и 7 , а также окружающей среды измерялась в экспериментах каждые

2 мин с помощью термопар 4, 6, 8 и регистрировалась с помощью многоканального измерительного прибора 9 (измеритель температуры и влажности фирмы

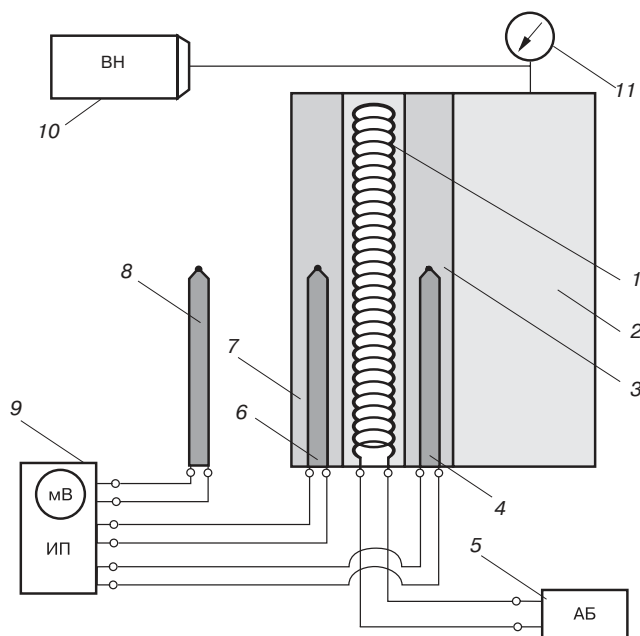


Рис. 1. Стенд для измерения удельного теплового сопротивления теплоизоляционных материалов: 1 — нагреватель; 2 — вакуумная теплоизоляционная панель; 3 — второй эталонный объект; 4, 6, 8 — термопары; 5 — источник электрической энергии (аккумуляторная батарея, 24 В); 7 — первый эталонный объект; 9 — измерительный прибор; 10 — вакуум-насос; 11 — вакуумметр

Fig. 1. Test bench for measuring the thermal resistance of insulating materials: 1 — heater; 2 — vacuum insulation panel; 3 — second prototype; 4, 6, 8 — thermocouples; 5 — electrical energy source (battery, 24 V); 7 — first prototype; 9 — measuring device; 10 — vacuum pump; 11 — vacuum gauge

CENTER). Расположенный с одной стороны нагревателя 1 первый эталонный объект 7 имеет поверхность, охлаждаемую за счет свободной конвекции атмосферным воздухом, а расположенный с другой стороны нагревателя второй эталонный объект 3 защищен от атмосферного воздуха вакуумной теплоизоляционной панелью 2. Вакуум во внутренних полостях вакуумной теплоизоляционной панели создавался с помощью вакуум-насоса 10, давление измерялось вакуумметром 11. Эксперименты показали, что температура первого эталонного объекта 7 растет медленнее, чем температура второго эталонного объекта 3. Сущность способа определения удельного теплового сопротивления вакуумной теплоизоляционной панели заключается в том, что разность скоростей изменения температур первого и второго эталонных объектов зависит от теплового сопротивления вакуумной теплоизоляционной панели.

Для определения удельного теплового сопротивления вакуумной теплоизоляционной панели с использованием стенда, показанного на рис. 1, необходимо получить его тарировочную характеристику. Для ее получения вместо вакуумной теплоизоляционной панели на второй эталонный объект размещалась теплоизоляция с известным коэффициентом теплопроводности и такими же габаритными размерами. На рис. 2 представлены результаты испытания известного теплоизоляционного материала Penoplex, имеющего коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,032 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

По осям ординат зависимостей (рис. 2) отложены величины относительной температуры эталонных объектов, под которой понималась разность между текущими значениями температуры и их первоначальными значениями, с которых начиналась регистрация температуры, $\theta = t_i - t_0$.

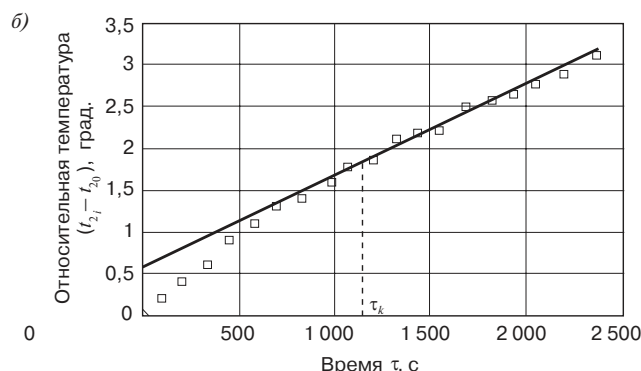
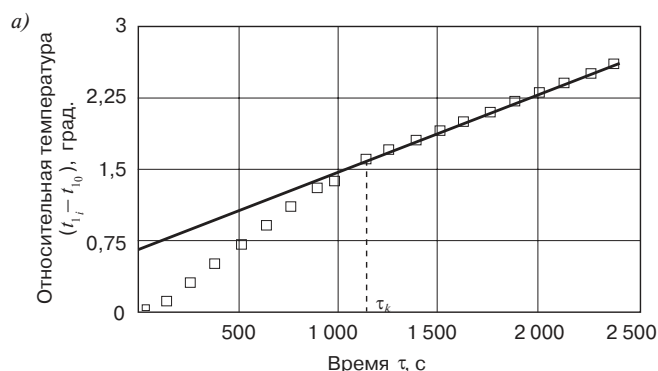


Рис. 2. Регрессионные зависимости относительной температуры первого (а) и второго (б) эталонных объектов от времени в виде полинома первого порядка

Fig. 2. Regression dependences of the relative temperature of the first (a) and second (b) prototypes on time as a first order polynomial

Начиная с некоторого момента времени τ_k , зависимость относительной температуры от времени можно описать полиномами первого порядка. Этот момент времени определялся из условия минимума среднеквадратического отклонения экспериментальных данных от регрессионных зависимостей. Регрессионные зависимости, показанные на рис. 2, были необходимы, чтобы рассчитать величину разности темпов нагрева двух эталонных объектов, сводя к минимуму ошибку измерений температуры, заметную на рис. 2, б в виде некоторого разброса экспериментальных данных относительно регрессионной зависимости. Регрессионные зависимости имеют следующий вид:

$$\theta_1(\tau) = a_0 + a_1\tau; \quad (1)$$

$$\theta_2(\tau) = b_0 + b_1\tau. \quad (2)$$

Если задать некоторый момент времени $\tau_x > \tau_k$ и приращение температуры Δt , например $\Delta t = 1^\circ\text{C}$, то, используя выражения (1) и (2), можно получить следующие выражения для темпов нагрева эталонных объектов:

$$\frac{\tau_1 - \tau_x}{\Delta t} = \frac{1}{a_1}; \quad (3)$$

$$\frac{\tau_2 - \tau_x}{\Delta t} = \frac{1}{b_1} \quad (4)$$

и выражение разности темпов нагрева эталонных объектов:

$$\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t} = \frac{b_1 - a_1}{a_1 b_1}. \quad (5)$$

Обработка экспериментальных данных, полученных при исследовании материала Penoplex, позволила определить значение разности темпов нагрева первого и второго эталонных объектов, равное 243,5 с/град. Это значение, а также известное значение коэффициента теплопроводности материала использовались для получения безразмерной тарифовочной характеристики экспериментального стенда. Для получения этой характеристики был построен виртуальный стенд в SolidWorks, являющийся цифровой копией экспериментального стенда, на котором были получены зависимости относительной температуры эталонных объектов от времени при исследовании материала Penoplex. В программе SolidWorks Simulation проводились тепловые исследования виртуального стенда. Целью первого (стационарного) теплового исследования был подбор значений коэффициента теплоотдачи окружающей среды и мощности тепловыделения, при которых средняя температура первого и второго эталонных объектов принимала такие же значения, какими были начальные значения t_0 в реальном физическом эксперименте. Целью второго

(нестационарного) теплового исследования было получение зависимости температур t_i первого и второго эталонных объектов от времени. При этом осуществлялся подбор значений коэффициента теплоотдачи окружающей среды и мощности тепловыделения, при которых средняя температура первого и второго эталонных объектов принимала такие же значения, какими были конечные значения в реальном эксперименте. Вместо материала Penoplex в исследованиях виртуального стенда использовался гипотетический материал с задаваемыми значениями коэффициента теплопроводности из диапазона 0,01–0,128 Вт/(м·К).

На рис. 3 показаны результаты расчета температур t_i первого (левый график) и второго (правый график) виртуальных эталонных объектов. Как видно из сравнения графиков, температура второго виртуального эталонного объекта, к которому присоединена модель теплоизоляционного гипотетического материала, с течением времени растет быстрее.

Значения температуры t_i первого и второго виртуальных эталонных объектов, показанные на рисунке, обрабатывались по формулам (1)–(5), так же как аналогичные значения реальных эталонных объектов, полученные в физическом эксперименте. В результате была получена зависимость разности темпов нагрева первого и второго виртуальных эталонных объектов от времени.

В исследованиях, выполненных с помощью виртуального стенда, у гипотетического теплоизоляционного материала изменялись не только значения коэффициента теплопроводности, но и значения плотности и удельной теплоемкости. В первом цикле исследований значения плотности и удельной теплоемкости гипотетического теплоизоляционного материала равнялись соответствующим значениям Penoplex, во втором цикле исследований данные значения были приняты равными соответствующим значениям для полиамида марки Ultratan 630, из которого изготавливались опытные образцы вакуумных теплоизоляционных панелей. На рис. 4 представлены результаты расчета разности темпов нагрева первого и второго эталонных объектов, полученные в первом и втором циклах исследования.

Регрессионные зависимости 1 и 2, показанные на рис. 4, могут быть представлены полиномами первого порядка:

$$\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t} \right)_{\text{calc stand}} = c_0 + c_1\lambda; \quad (6)$$

$$\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t} \right)_{\text{calc vac}} = d_0 + d_1\lambda, \quad (7)$$

где индекс *calc stand* относится к результатам расчета данных виртуального стенда первого цикла

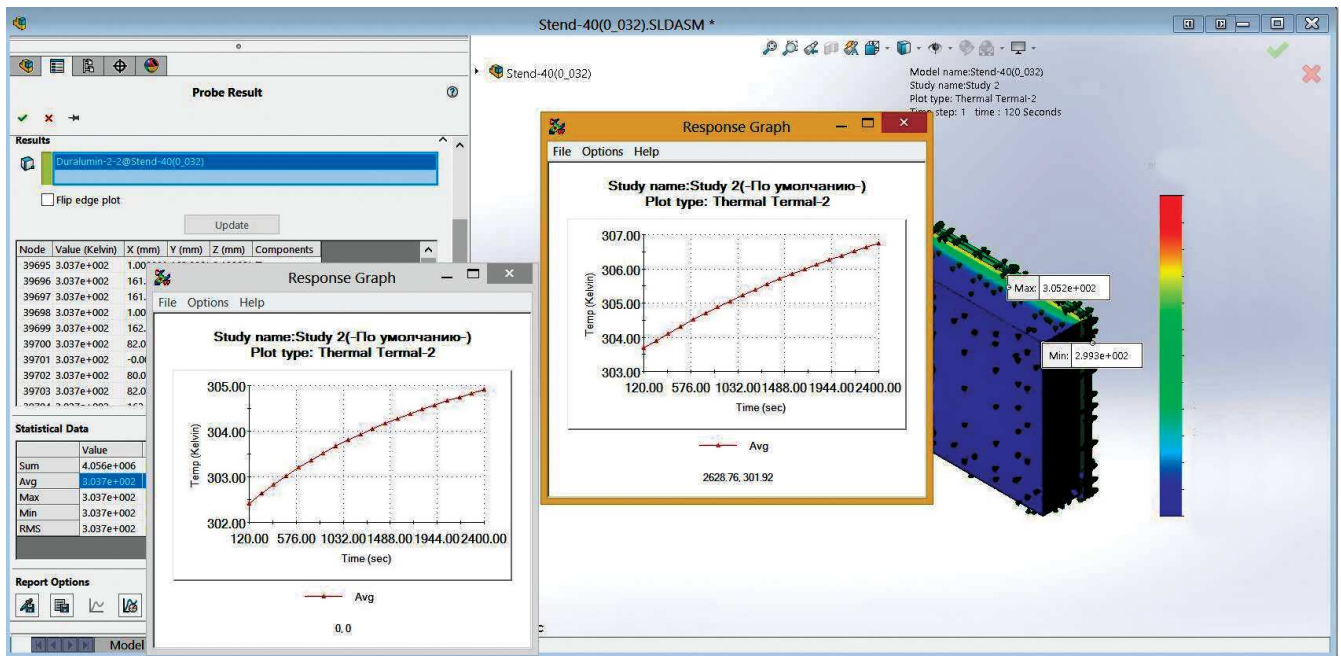


Рис. 3. Результаты нестационарного теплового исследования виртуального стенда при задании значения коэффициента теплопроводности исследуемого теплоизоляционного материала 0,032 Вт/(м · К)

Fig. 3. Results of transient thermal tests on the virtual test bench, given a thermal conductivity coefficient of the insulation material under test of 0.032 W/(m · K)

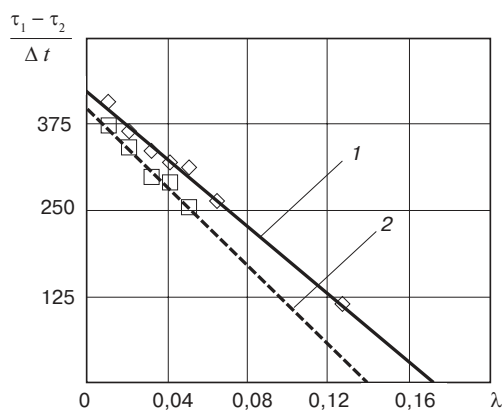


Рис. 4. Зависимости разности темпов нагрева первого и второго эталонных объектов от значений коэффициента теплопроводности λ : $\square, \diamond$ — результаты расчета данных исследований виртуального стенда; 1 — регрессионная зависимость данных первого цикла исследований; 2 — регрессионная зависимость данных второго цикла исследований

Fig. 4. Dependencies of the difference between the heating rates of the first and second prototypes on the values of the thermal conductivity coefficient λ :

$\square, \diamond$ — calculation results of the virtual test bench study data; 1 — regression dependence of the first cycle study data; 2 — regression dependence of the second cycle study data

исследований модели теплоизоляционного материала, а индекс *calc vac* относится к результатам расчета данных виртуального стенда второго цикла исследований.

Для создания тарировочной характеристики стенда, пригодной для обработки данных экспериментального исследования вакуумных теплоизоляционных панелей, предложено использовать зависимость относительной разности темпов нагрева первого и второго эталонных объектов от значений коэффициента теплопроводности в безразмерном виде:

$$\overline{\Delta\tau} = f(\overline{\lambda}); \quad \overline{\Delta\tau} = \frac{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{calc\ stand}}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{exper}}; \quad (8)$$

$$\overline{\lambda} = \frac{\lambda_{calc\ stand}}{\lambda_{exper}},$$

где индекс *exper* относится к данным экспериментальных исследований материала Penoplex. Подставляя обозначения безразмерных величин (8) в уравнение (6), можно получить вид тарировочной характеристики:

$$\overline{\Delta\tau} = \frac{c_0}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{exper}} + c_1 \frac{\lambda_{exper}}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{exper}} \overline{\lambda}. \quad (9)$$

Для использования этой тарировочной характеристики при обработке данных экспериментальных

исследований вакуумных теплоизоляционных панелей необходимо решить следующее уравнение относительно неизвестной величины $\bar{\lambda}$:

$$\frac{c_0}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{\text{exper}}} + c_1 \frac{\lambda_{\text{exper}} \bar{\lambda}}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{\text{exper}}} = \frac{d_0}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{\text{vac}}} + d_1 \frac{\lambda_{\text{exper}} \bar{\lambda}}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{\text{vac}}}, \quad (10)$$

где индекс *vac* относится к данным экспериментальных исследований вакуумной теплоизоляционной панели.

Результаты исследования. Для проведения экспериментальных исследований методом 3D-печати были изготовлены три опытных образца вакуумных теплоизоляционных панелей в виде герметичных корпусов с толщиной стенок 1,5 мм и различной толщиной ребер жесткости. Варианты опытных образцов представлены на рис. 5. Ребра жесткости выполнялись с поперечным сечением в форме ромбов (рис. 5, а, б) или шестигранных сот (рис. 5, в).

При испытаниях опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей на стенде, показанном на рис. 1, для создания вакуума внутри панелей использовался пластинчато-роторный насос RS-1, для регистрации температуры использовались два прибора CENTER-314 (погрешность по паспорту $\pm 0,2\%$).

Основное назначение экспериментального исследования опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей состояло в валидации виртуального стенда для испытаний вакуумных панелей на стационарном режиме.

Для сравнения опытных и расчетных значений эффективного коэффициента теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей в виртуальном стенде вместо модели теплоизоляционного материала устанавливались 3D-модели опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей, показанных на рис. 5.

В стационарном тепловом исследовании виртуального стенда в программе SolidWorks Simulation измерялась средняя температура двух противоположных поверхностей модели вакуумной теплоизоляционной панели и величина среднего результирующего теплового потока через одну из этих поверхностей. Эффективный коэффициент теплопроводности находился как частное от деления среднего результирующего теплового потока на разность средних температур поверхностей, умноженное на толщину панели.

На внутренних поверхностях моделей вакуумных теплоизоляционных панелей задавались значения

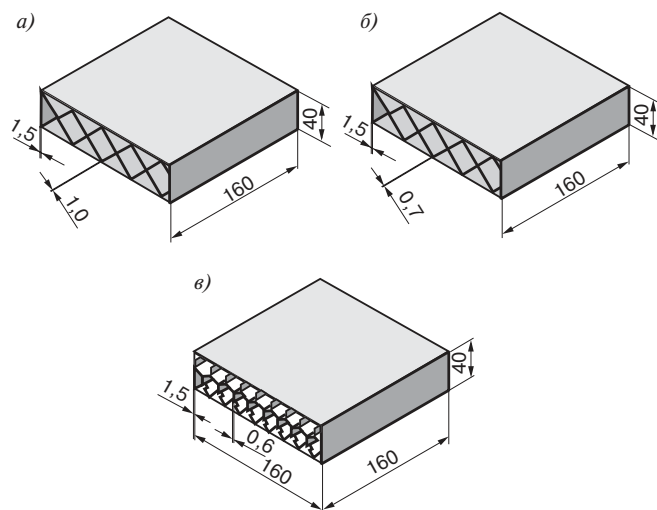


Рис. 5. Варианты вакуумных теплоизоляционных панелей: а — ребра жесткости в виде ромбов толщиной 1 мм; б — ребра жесткости в виде ромбов толщиной 0,7 мм; в — ребра жесткости в виде шестигранных сот толщиной 0,6 мм

Fig. 5. Vacuum insulation panel options: а — stiffeners in the form of lozenges 1 mm thick; б — stiffeners in the form of lozenges 0.7 mm thick; в — stiffeners in the form of hexagonal honeycombs 0.6 mm thick

средних температур их наружных поверхностей и коэффициенты теплоотдачи, определяемые с учетом плотности воздуха и, следовательно, давления по известной формуле для свободной конвекции:

$$\alpha_{\text{free conv}} = 0,18 \frac{\lambda_{\text{air}}}{h} \left[\frac{\rho_{\text{air}}^2 g \beta_i C_p |T_1 - T_2| h^3}{\lambda_{\text{air}} \mu_{\text{air}}} \right]^{0,25}, \quad (11)$$

где λ_{air} — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); h — характерный размер ячейки вакуумных панелей, м; ρ_{air} — плотность воздуха (величина прямо пропорциональная давлению в полостях панелей), кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; β_i — коэффициент температурного расширения воздуха; C_p — удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); T_1 и T_2 — температура противоположных стенок ячеек сот, К; μ_{air} — коэффициент динамической вязкости воздуха, Н·с/м².

Кроме теплопереноса путем теплопроводности и конвективного теплообмена в моделях вакуумных теплоизоляционных панелей учитывался радиационный теплообмен между внутренними поверхностями корпусов панелей.

Обсуждение. На рис. 6 показан пример обработки данных испытаний варианта вакуумной теплоизоляционной панели, изображенной на рис. 5, б, при давлении во внутренних полостях панели 50 кПа.

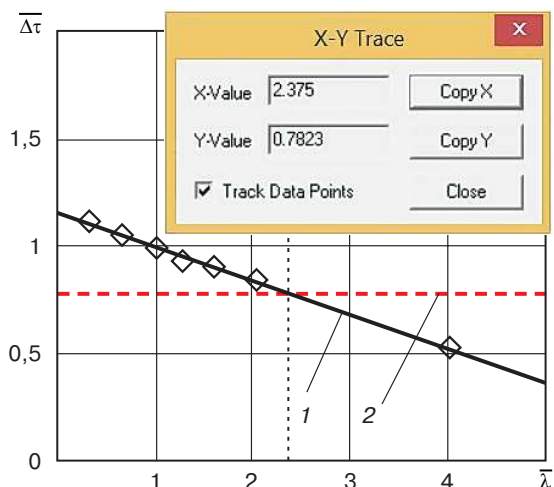


Рис. 6. Обработка данных испытаний вакуумной теплоизоляционной панели с толщиной ребер 1 мм:
1 — тарировочная характеристика стенда; 2 — относительная разность темпов нагрева первого и второго эталонных объектов, найденная из эксперимента, $\Delta\tau = 0,7823$

Fig. 6. Processing of test data for a vacuum panel with a rib thickness of 1 mm:

1 — calibration characteristic of the test bench; 2 — relative difference between the heating rates of the first and second prototypes, obtained from the experiment, $\Delta\tau = 0,7823$

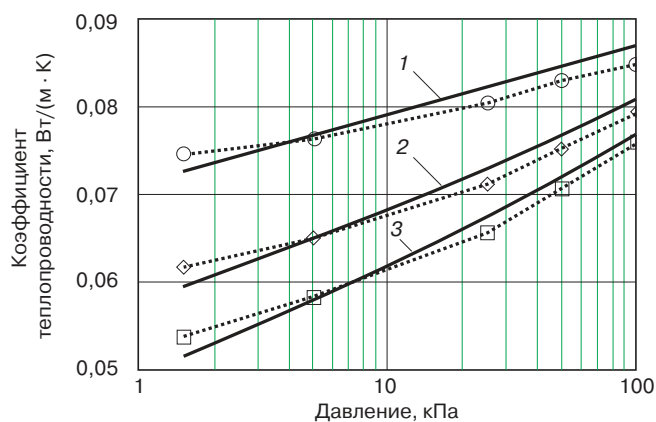


Рис. 7. Сравнение опытных и расчетных значений эффективного коэффициента теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей:

1 — расчетные значения λ панели с толщиной ребер 1 мм;
2 — расчетные значения λ панели с толщиной ребер 0,7 мм;
3 — расчетные значения λ панели с толщиной ребер 0,6 мм;
пунктирные линии — опытные значения λ соответственно

Fig. 7. Comparison of experimental and calculated values of the effective thermal conductivity coefficient of vacuum insulation panels:

1 — calculated values of the λ panel with a rib thickness of 1 mm;
2 — calculated values of the λ panel with a rib thickness of 0.7 mm;
3 — calculated values of the λ panel with a rib thickness of 0.6 mm;
dotted lines — experimental values of the λ

Как видно из рис. 6, при значении относительной разности темпов нагрева первого и второго эталонных объектов, найденной из эксперимента, $\Delta\tau = 0,7823$

значение коэффициента теплопроводности в безразмерном виде равно $\bar{\lambda} = 2,375$. Значение эффективного коэффициента теплопроводности опытного образца вакуумной теплоизоляционной панели находится как произведение коэффициента теплопроводности в безразмерном виде на коэффициент теплопроводности материала Penoplex, использованного для тарировки стенда, т. е. $\lambda = 2,375 \cdot 0,032 = 0,076$ Вт/(м·К), что более чем в два раза больше, чем у современных теплоизоляционных материалов. Это связано с тем, что толщина опытных образцов была ограничена величиной 40 мм, а эффективность (удельное тепловое сопротивление) вакуумных теплоизоляционных панелей повышается пропорционально квадрату толщины панели, так как эффективный коэффициент теплопроводности обратно пропорционален длине ребер жесткости.

На рис. 7 показано сравнение экспериментальных значений эффективного коэффициента теплопроводности опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей, показанных на рис. 5, и их расчетных значений, определенных с помощью стационарного теплового исследования виртуального стенда в SolidWorks Simulation.

Как видно из рис. 7, минимальными значениями эффективного коэффициента теплопроводности обладает вакуумная теплоизоляционная панель с ребрами жесткости в виде шестигранников и толщиной 0,6 мм. Эти значения лежат в диапазоне от 0,076 до 0,054 Вт/(м·К) при давлении внутри панелей от 100 до 0,5 кПа. Получение меньших значений эффективного коэффициента теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей возможно при увеличении толщины панелей и уменьшении давления воздуха внутри их корпусов.

Сравнение опытных и расчетных значений эффективного коэффициента теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей показало, что средне-квадратическая погрешность составила не более 5%.

Использование тарировочной характеристики, полученной с помощью виртуального стенда, позволило проводить экспериментальные исследования каждого опытного образца вакуумных теплоизоляционных панелей не более 40 мин, что существенно меньше времени выхода на стационарный тепловой режим в известных методах измерений [4–10].

На основе предлагаемого метода определения эффективного коэффициента теплопроводности материалов может быть изготовлен переносной прибор для оценки качества теплоизоляции пассажирского вагона при входном и выходном контроле во время капитального ремонта. Ожидаемый экономический эффект от использования такого прибора в условиях пассажирского депо образуется от возможного уменьшения объема ремонтных работ по замене теплоизоляции пассажирского вагона при неподтверждении

дефектов, выявленных тепловизором, а также от повышения качества ремонта за счет измерения коэффициента теплопроводности теплоизоляции после ее замены.

Заключение. В работе представлены результаты экспериментального определения эффективного коэффициента теплопроводности трех опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей, выполненного на специально разработанном экспериментальном стенде.

Для тарирования экспериментального стенда использовались данные испытаний теплоизоляционного материала Penoplex с известными свойствами и цифровой аналог экспериментального стенда — виртуальный стенд, выполненный в виде 3D-модели в программе SolidWorks. Исследование нестационарного теплового процесса 3D-модели стенда в SolidWorks Simulation позволило построить тарировочную характеристику, что существенно сэкономило время и ресурсы при экспериментальном определении эффективного коэффициента теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей.

Для сравнения опытных и расчетных значений эффективного коэффициента теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей в виртуальном стенде вместо модели теплоизоляционного материала устанавливались 3D-модели опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей. Исследование стационарного теплового процесса 3D-моделей вакуумных теплоизоляционных панелей в программе SolidWorks Simulation проводилось при учете теплопереноса путем теплопроводности, конвективного и радиационного теплообмена. Коэффициент теплоотдачи конвективного теплообмена рассчитывался для свободной конвекции с учетом величины давления во внутренних полостях вакуумных теплоизоляционных панелей. Сравнение опытных и расчетных значений эффективного коэффициента теплопроводности исследованных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей показало, что расхождение составляет менее 5%.

Переносной прибор для оценки качества теплоизоляции пассажирского вагона, изготовленный на основе предлагаемого метода определения эффективного коэффициента теплопроводности материалов, может использоваться при входном и выходном контроле теплоизоляции пассажирского вагона во время капитального ремонта.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. ГОСТ 34681—2020. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования: дата введения 2021-03-01. М.: Стандартинформ, 2020, 36 с. [GOST 34681—2020. *Passenger cars on locomotive traction. General technical requirements*. Introduction date 2021-03-01. Moscow: Standartinform; 2020, 36 p. (In Russ.).]
2. Balalaev A., Parenjuk M., Arslanov I., Ziyatdinov A. Mass and heat-insulation properties of the bodies of passenger and insulated railway cars made of vacuum honeycomb panels. *Journal of Applied Engineering Science*. 2018;16(1):50-59. <https://doi.org/10.5937/jaes16-13888>.
3. Патент №2571834 C2 Российская Федерация, МПК B61D 17/18, B60P 3/20, F16L 59/065. Вакуумное теплоизоляционное изделие (варианты): №2013157470/11: заявл. 24.12.2013: опубл. 20.12.2015 / Балалаев А. Н., Мокшанов А. С., Попов Д. А. 13 с. [Balalaev A. N., Mokshanov A. S., Popov D. A. *Patent No. 2571834 (C2). B60P3/20, B61D17/18, E04B1/80. Vacuum thermal insulation product (versions): No. 2013157470/11: appl. 24.12.2013, publ. 20.12.2015*. 13 p. (In Russ.).]
4. British Standard BS 874. *British standard methods for determining thermal insulating properties. Part 3: Tests for thermal transmittance and conductance. Section 3.1: Guarded hot-box method*. Released 1986-11-28. London: British Standards Institution; 1987. 26 p.
5. British Standards BS EN 675:2011. *Glass in building. Determination of thermal transmittance (U value). Heat flow meter method*. Released 2011-06-30. London: British Standards Institution; 2011. 18 p.
6. British Standards BS EN ISO 8990:1996. *Thermal insulation. Determination of steady state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box*. Released 1996-12-15. London: British Standards Institution; 1996. 26 p.
7. ISO 9869-1-2014. *Thermal insulation — Building elements — In-situ measurements of thermal resistance and thermal transmittance*. Released 2014-08-01. Geneva: ISO; 2014. 36 p.
8. BS EN ISO 8990:1996. *Thermal insulation. Determination of steady-state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box*. Released 1996-12-15. London: British Standards Institution; 1998. 26 p.
9. ASTM C1046-95. *Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components*. West Conshohocken: ASTM; 2021. 10 p. <https://doi.org/10.1520/C1046-95R21>.
10. ASTM C1155-95. *Standard practice for determining thermal resistance of building envelope components from the in-situ data*. West Conshohocken: ASTM; 2021. 8 p. <https://doi.org/10.1520/C1155-95R21>.
11. Atsonios I. A., Mandilaras I. D., Kontogeorgos D. A., Founti M. A. A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls. *Energy and Building*. 2017;154:198-206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.064>.
12. Baldinelli G. A methodology for experimental evaluations of low-e barriers thermal properties: field tests and comparison with theoretical models. *Building and Environment*. 2010;45(4):1016-1024. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.009>.
13. Gaspar K., Casals M., Gangoles M. A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value. *Energy and Buildings*. 2016;130:592-599. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.072>.
14. Deconinck A.-H., Roels S. Comparison of characterisation methods determining the thermal resistance of building components from onsite measurements. *Energy and Buildings*. 2016;130:309-320. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.061>.
15. Desogus G., Mura S., Ricciu R. Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings*. 2011;43(10):2613-2620. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.025>.

16. Chaffar K., Chauchois A., Defer D., Zalewski L. Thermal characterization of homogeneous walls using inverse method. *Energy and Buildings*. 2014;78:248–255. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.038>.

17. Arya F., Moss R., Hyde T., Shire S., Henshall P., Eames P. Vacuum enclosures for solar thermal panels. Part 1: Fabrication and hot-box testing. *Solar Energy*. 2018;174:1212–1223. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.064>.

18. Arya F., Moss R., Hyde T., Shire S., Henshall P., Eames P. Vacuum enclosures for solar thermal panels. Part 2: Transient testing with an uncooled absorber plate. *Solar Energy*. 2018;174:1224–1236. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.063>.

19. Dulnev G. N. The theory of thermal regular regime and its application to the determination of thermal characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1960;1(2-3):152–160. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(60\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(60)90019-3).

20. Nekhendzi E. J. Method of a regular regime for the determination of variable thermal coefficients. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1961;3(4):311–320. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(61\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(61)90046-1).

21. Голубин А. А., Белова Н. В., Науменко С. Н. Влияние погрешностей измерения при определении коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций изотермического вагона // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, № 2. С. 100–104 [Golubin A. A., Belova N. V., Naumenko S. N. Effect of measurement errors in determining the heat transfer coefficient of the enclosing structures of an isothermal car. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(2):100–104. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-2-100-104>.

22. Балалаев А. Н., Тимкин Д. М. Теоретические и экспериментальные исследования вакуумной панели ячеистой структуры // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 8 (110). С. 39–47 [Balalaev A. N., Timkin D. M. Theoretical and experimental studies of a vacuum panel with a cellular structure. *International Research Journal*. 2021;(8):39–47 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.006>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий Николаевич БАЛАЛАЕВ,
д-р техн. наук, профессор, кафедра вагонов, Самарский государственный университет путей сообщения (443066, г. Самара, ул. Свободы, 2В), Author ID: 267860, <https://orcid.org/0000-0003-0839-6858>

Мария Анатольевна ПАРЕНЮК,
канд. техн. наук, доцент, кафедра вагонов, Самарский государственный университет путей сообщения (443066,

г. Самара, ул. Свободы, 2В), Author ID: 404616, <https://orcid.org/0000-0001-9965-1310>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoly N. BALALAEV,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Wagons, Samara State Transport University (443066, Samara, 2v, Freedom St.), Author ID: 267860, <https://orcid.org/0000-0003-0839-6858>

Maria A. PARENYYUK,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Wagons, Samara State Transport University (443066, Samara, 2v, Freedom St.), Author ID: 404616, <https://orcid.org/0000-0001-9965-1310>

ВКЛАД АВТОРОВ

Анатолий Николаевич БАЛАЛАЕВ. Обоснование методики проведения эксперимента на стенде, редактирование и подготовка текста рукописи (50%).

Мария Анатольевна ПАРЕНЮК. Методика обработки данных реального и виртуального экспериментов, методика использования цифрового двойника экспериментального стенда (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Anatoly N. BALALAEV. Justification of the methodology of the test bench experiment, editing and preparation of the paper (50%).

Maria A. PARENYYUK. Methodology for processing data from real and virtual experiments, methodology for using a digital twin of the test bench (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 16.03.2023, рецензия от первого рецензента получена 14.04.2023, рецензия от второго рецензента получена 18.04.2023, принята к публикации 25.04.2023.

The article was submitted 16.03.2023, first review received 14.04.2023, second review received 18.04.2023, accepted for publication 25.04.2023.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.