

РЕГУЛИРУЕМАЯ ВАКУУМНАЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ

Светлана Валерьевна Плотникова¹, Роман Валерьевич Гришин^{2,3},
Валерий Викторович Плотников⁴, Александр Сергеевич Кузнецов^{5,6},
Олег Геннадьевич Вощило^{7,8}

^{1,3,4,6,8}Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия,

^{2,5,7}Инновационные строительные технологии, Москва, Россия,

¹wonderlandru@gmail.com, ^{2,3}79051008098@yandex.ru, ⁴plotn57@mail.ru,

^{5,6}79208511190@yandex.ru, ^{7,8}oleg1406@yandex.ru

Аннотация. Представлена инновационная вакуумная теплоизоляция с автоматизированным регулированием теплозащиты зданий, отражены особенности разработанных установок для определения теплопроводности вакуумной теплоизоляции с высокой степенью достоверности, приведены результаты исследования теплопроводности вакуумированных изделий с различными наполнителями. Показано, что инновационные наружные стены и светопрозрачные ограждающие конструкции зданий с использованием автоматизированной вакуумной теплоизоляции позволяют повысить теплозащиту объектов различного назначения в 5–10 раз по сравнению с традиционными системами теплозащиты. Разработанная система рекомендуется для использования с целью повышения тепловой защиты и экологической безопасности строительных, военных и космических объектов. В статье отражены особенности автоматизированного управления теплофизическими свойствами теплозащитной оболочки здания путем применения системы «умный дом».

Ключевые слова: вакуумная теплоизоляция, коэффициент теплопроводности, тепловая защита, ограждающие конструкции, автоматизированное управление, экологическая безопасность

Для цитирования: Регулируемая вакуумная теплоизоляция для повышения энергоэффективности и экологической безопасности зданий / С. В. Плотникова [и др.]. // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2025. Выпуск 2025-3(173) Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. С. 65–75. doi: 10.71536/vd.2025.3c173.7. edn: ehhgqo.

Original article

USING AN ADJUSTABLE VACUUM THERMAL INSULATION TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF BUILDINGS

Svetlana V. Plotnikova¹, Roman V. Grishin^{2,3}, Valery V. Plotnikov⁴, Alexander S. Kuznetsov^{5,6},
Oleg G. Voshchilo^{7,8}

^{1,3,4,6,8}Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk, Russia,

^{2,5,7}Innovative Construction Technologies, Moscow, Russia,

¹wonderlandru@gmail.com, ^{2,3}79051008098@yandex.ru, ⁴plotn57@mail.ru,

^{5,6}79208511190@yandex.ru, ^{7,8}oleg1406@yandex.ru

Abstract. Innovative vacuum thermal insulation with automated regulation of thermal protection of buildings is presented, the features of the developed installations for determining the thermal conductivity of vacuum thermal insulation with a high degree of reliability are reflected, and the results of a study of the thermal

© Плотникова С. В., Гришин Р. В., Плотников В. В., Кузнецов А. С., Вощило О. Г., 2025



conductivity of evacuated products with various fillers are presented. It is shown that innovative exterior walls and translucent enclosing structures of buildings using automated vacuum thermal insulation can increase the thermal protection of objects for various purposes by 5–10 times compared with traditional thermal protection systems. The developed system is recommended for use to enhance thermal protection and environmental safety of construction, military and space facilities. The article reflects the features of automated control of the thermophysical properties of the heat shield of a building through the use of a smart home system.

Keywords: vacuum thermal insulation, coefficient of thermal conductivity, thermal protection, enclosing structures, automated control, environmental safety

For citation: Using an adjustable vacuum thermal insulation to increase energy efficiency and environmental safety of buildings / S. V. Plotnikova [et al.]. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Buildings and structures using new materials and technologies.* 2025;3(173):65–75. (In Russ.). doi: 10.71536/vd.2025.3c173.7. edn: ehhgqo.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

В современной строительной практике при создании энергоэффективных зданий широко применяются многослойные конструкции наружных стен, включающие в себя различные эффективные утеплители плотностью от 30 до 150 кг/м³. Однако, ориентация на неизменные теплофизические характеристики наружных стен является неоптимальной, учитывая колебания режимов эксплуатации зданий в разные сезоны и снижение теплоизоляционных свойств утеплителей со временем (10–30 лет) из-за их меньшей долговечности по сравнению с основными материалами стен. В России распространена технология многослойных стен из кирпича, бетона или их комбинаций с внутренним слоем утеплителя. Существенным недостатком таких ограждающих конструкций является сложность ремонта и замены утеплителя при утрате его свойств, требующая значительных затрат на дополнительное утепление фасада.

В результате снижения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций разница между температурой воздуха внутри помещений и температурой внутренних поверхностей стен нередко превышает допустимые нормы (4 °C для жилых и 4,5 °C для общественных зданий), что приводит к повышенной влажности стен и образованию плесени. Увлажнение материалов снижает теплозащиту и экологичность стен. Кроме того, используемые пенопласты и минеральная вата могут выделять токсичные вещества, загрязняющие воздух и наносящие вред здоровью. В холодное время года естественная вентиляция часто не обеспечивает нормативный воздухообмен из-за герметичности современных ограждающих конструкций и нарушения планомерности проветривания, что приводит к превышению концентрации углекислого газа в помещениях.

Уже свыше трех десятилетий вакуумная теплоизоляция, а именно вакуумные изоляционные панели (ВИП), активно применяется в различных странах [1]. ВИП представляют собой тонкие и высокоэффективные изоляционные материалы, в основе которых лежит пористый материал с низкой теплопроводностью, например, пирогенный кремнезем, перлит или стекловолокно. Этот материал герметично упакован в оболочку, из которой откачен воздух для создания вакуума. Несмотря на свои преимущества, ВИП имеют ряд ограничений. К ним относятся строгие требования к транспортировке, сложность монтажа, невозможность адаптации к нестандартным размерам, ухудшение теплоизоляционных характеристик при повреждении и сложность поддержания вакуума в течение длительного времени.

Представленная в статье разработка акцентируется на новой системе теплозащиты зданий, основанной на автоматизированной вакуумной теплоизоляции (АВТ). Эта система позволяет регулировать теплофизические свойства ограждающих конструкций в зависимости от внешних условий. На данный момент отсутствуют исследования по созданию подобной системы и оценке ее влияния на энергоэффективность и экологическую безопасность зданий с учетом их жизненного цикла. В рамках данной научной работы созданы установки для измерения теплопроводности вакуумной теплоизоляции в соответствии с патентом на изобретение № 2750289 [2] и патентом на полезную модель № 228929 [3], разработаны и представлены концептуальные схемы АВТ с автоматическим управлением для светопрозрачных элементов (окон и витражей) и стековых конструкций зданий, проведено исследование зависимости теплопроводности АВТ от типа используемого ультрадисперсного наполнителя и уровня создаваемого вакуума.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ.

В настоящее время существует множество исследований, посвященных проблемам, связанным с использованием вакуумной изоляции в строительстве [4; 5; 6]. Материалы, составляющие ядро ВИП, должны

соответствовать определенным требованиям. Среди основных типов наполнителей для ВИП выделяют пенопласти, волокнистые материалы, порошкообразные вещества и композиции из волокон и порошков [7; 8]. Строгие требования к высокому вакууму, негативное воздействие на окружающую среду и воспламеняемость пенопластовых заполнителей ограничивают их применение для вакуумной теплоизоляции стен зданий. Хотя волокна обладают низкой теплопроводностью, этот материал сердцевины ВИП требует создания высокого вакуума. Несмотря на более высокую теплопроводность порошков по сравнению с другими материалами сердечника, они привлекают больше внимания благодаря ожидаемой долговечности. В ВИП с сердечником из стекловолокна, требующем высокого вакуума, необходимы геттеры для сбора и удаления газов, так как размер пор волокнистого сердечника больше, чем, например, у сердечника из коллоидного кварца. Основные газы, проникающие в ядро ВИП, – это азот, кислород, водород, углекислый газ и водяной пар. Водяной пар можно удалять с помощью доступных CaSO_4 и CaO , а газы, такие как O_2 , H_2 , CO_2 и N_2 , – активными металлами, например, барием, цирконием и их сплавами. Важно отметить, что эти металлы могут образовывать комплексы или реагировать с водой, снижая свою способность поглощать газы. Поэтому геттерная система должна сначала удалять водяной пар, а затем другие газы.

Немало проблем при создании ВИП-панелей связано с выбором материалов для мембран. Основная функция мембран – предотвращение попадания воздуха из внешней среды в ядро и, таким образом, поддержание высокого вакуума внутри. Когда газы попадают во внутреннее ядро, давление внутри панели увеличивается, что приводит к повышению теплопроводности изделия и в конечном итоге к окончанию срока его службы. Толщина ВИП-мембраны обычно составляет 100–200 мкм. Мембранны ВИП часто состоят из герметизирующего слоя, барьерного слоя и защитного слоя [4; 5; 6]. Внутренний слой является герметизирующим слоем. Этот слой герметизирует основной материал оболочки и традиционно состоит из полиэтилена низкой или высокой плотности, поверхности которого термосвариваются двумя горячими стержнями под давлением для соединения друг с другом. Средний слой является барьерным слоем, который ранее выполняли, как правило, из алюминиевой фольги [8]. В настоящее время начинают широко использовать многослойные оболочки на основе полимерной пленки из полиэтилентерефталата с металлизированным покрытием. Целью барьерного слоя является предотвращение проникновения водяного пара и воздуха через оболочку в ядро ВИП. Внешний защитный слой может состоять из стекловолокна или прозрачного лака для улучшения огнестойкости. Дополнительной защитный слой из обычного пенополистирола или экструдированного пенополистирола, слоев резиновых гранул или твердых полимерных пластин может сделать панель более прочной и менее уязвимой при транспортировке и монтаже. Мембрана является наиболее важным элементом для обеспечения длительного срока службы ВИП. Оценка мембранных материалов ВИП включает в себя скорость проникновения газов, в том числе кислорода и паров воды. Применение мембран ВИП требует оценки синергетического эффекта слоя фольги и слоя полимера.

Процесс производства ВИП сложен и включает вакуумную откачку и термосварку. Поэтому после того, как изделия сформованы, их нельзя разрезать. Однако в процессе нанесения на настоящие стены сложно изготовить ВИП одного размера для особых мест, например углов здания и обрамления окон. По сравнению с традиционными материалами, которые легко режутся на нужные размеры, этот аспект представляет собой серьезное ограничение для ВИП – панелей. Кроме того, при транспортировке, хранении на строительной площадке, строительстве и эксплуатации мембранны ВИП могут быть легко проколоты, что приведет к потере вакуума и значительному увеличению теплопроводности.

В целом ВИП – это теплоизоляционные изделия с явными преимуществами и недостатками. Для повышения эффективности и долговечности вакуумной теплоизоляции необходимы новые подходы к ее устройству и использованию. Актуальным направлением исследований является создание автоматизированной вакуумной теплоизоляции, позволяющей регулировать уровень вакуума в системе и управлять теплозащитными функциями ограждающих конструкций зданий в зависимости от ряда факторов.

Целью настоящей работы является исследование с помощью созданных установок теплопроводности вакуумной теплоизоляции с различными наполнителями и создание инновационной системы теплозащиты с автоматизированным управлением ее теплофизическими свойствами.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы и методы

Для изучения теплопроводящих свойств вакуумной теплоизоляции применялись различные мелкодисперсные и обладающие высокой пористостью материалы. В частности, использовались ковелос (аморфная

форма диоксида кремния), стекловолокно и перлит. Изображения этих наполнителей, полученные с помощью электронной микроскопии, представлены на рисунке 1.

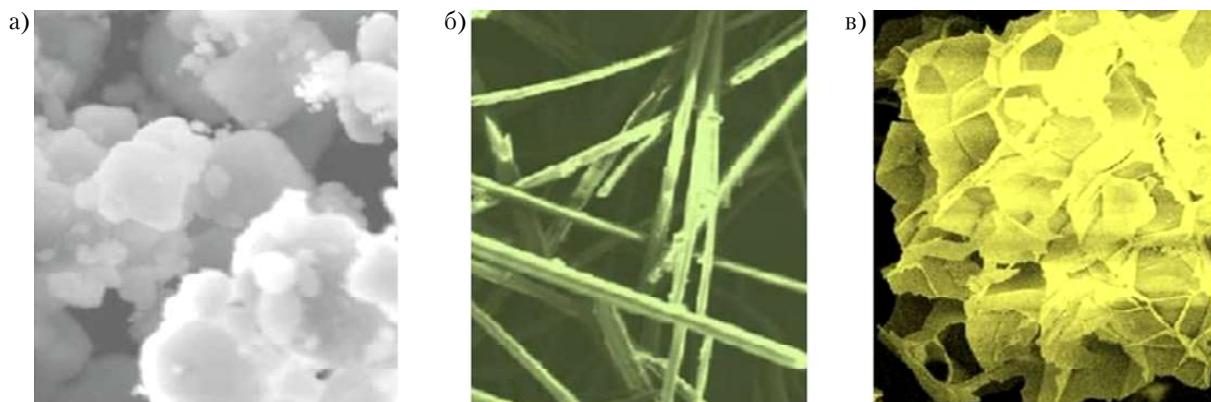


Рисунок 1 – Электронно-микроскопическое исследование порошка ковелоса (аморфного диоксида кремния) (а), стекловолоконного наполнителя (б) и частиц перлита (в).

С целью изучения функционирования автоматизированной вакуумной теплоизоляции с разнообразными типами заполнителей применялась управляемая дистанционно установка, представленная на рисунке 2.

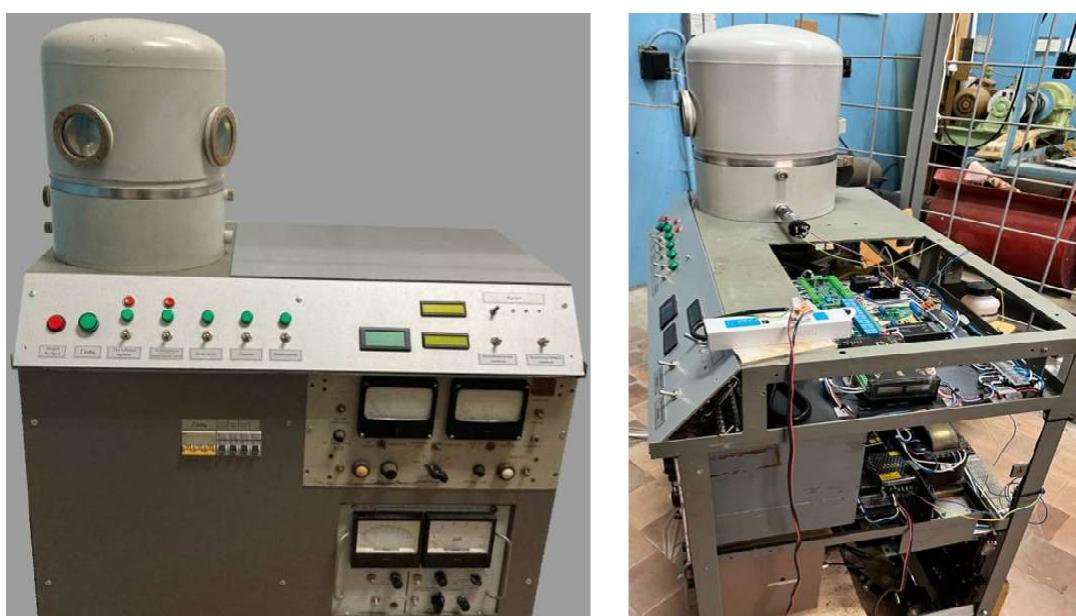


Рисунок 2 – Общий вид установки с дистанционным управлением для исследования теплопроводности вакуумной теплоизоляции.

Результаты исследования влияния степени вакуума в рабочей камере на коэффициент теплопроводности образцов с различными наполнителями представлены на рисунке 3.

На рисунках 4 и 5 продемонстрирована вакуумная теплоизоляция жилого двухэтажного здания с автоматическим контролем тепловых характеристик внешних стен, а также схема ее установки в частном доме.

Внешняя часть стены формируется из вакуумных теплоизоляционных панелей (1), которые соединены с вакуумным распределителем (2). Этот узел обеспечивает поддержание заданного вакуума в элементах всей системы. Фасадный защитный экран (3) служит для оберегания панелей от негативных факторов внешней среды, включая механические повреждения и ультрафиолетовое излучение.

Вакуумная теплоизоляция может быть интегрирована в разнообразные типы ограждающих конструкций, в том числе наружные стены, а также светопрозрачные элементы, такие как окна и витражи. Пример

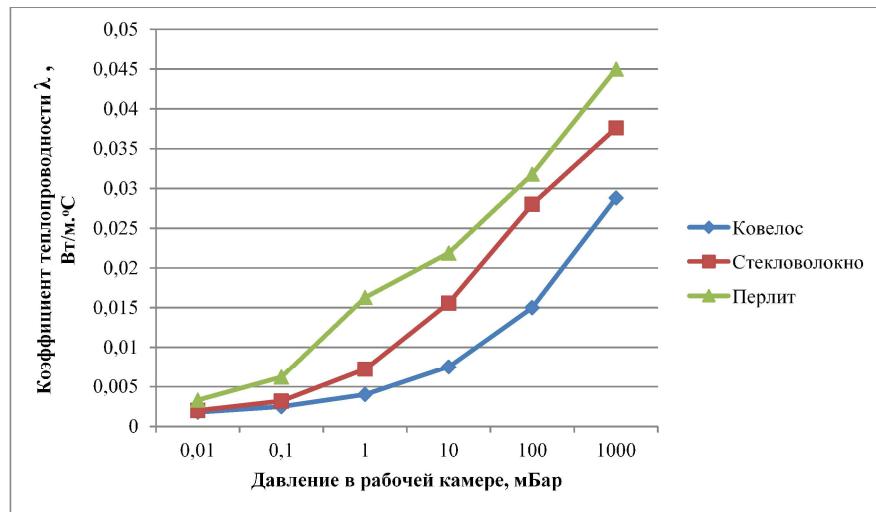


Рисунок 3 – Зависимость теплопроводности вакуумной теплоизоляции от степени вакуума и вида наполнителя.

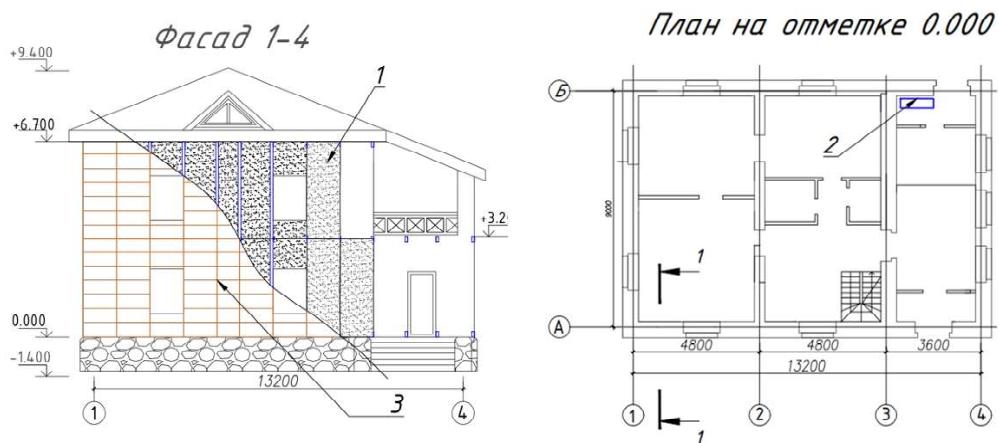


Рисунок 4 – Вакуумная теплоизоляция стеновых ограждающих конструкций индивидуального жилого дома: 1 – вакуумная теплоизоляция с управляемыми теплофизическими свойствами; 2 – вакуумный распределительный узел; 3 – защитный слой вакуумной теплоизоляции.

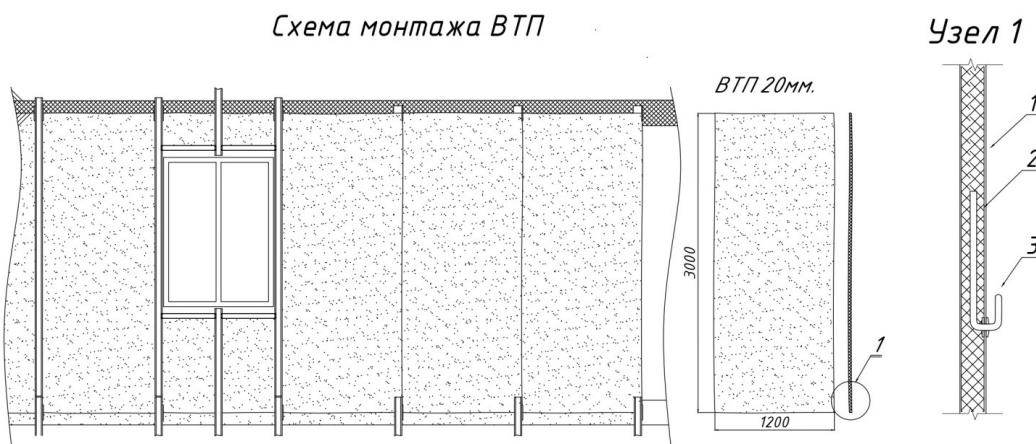


Рисунок 5 – Схема монтажа вакуумированных теплоизоляционных панелей (ВТП) к фасаду здания: 1 – вакуумированная теплоизоляционная панель; 2 – ковелос (аморфный кремнезем); 3 – штенгель.

автоматизированной системы вакуумной теплоизоляции для светопрозрачных конструкций показан на рисунке 6.

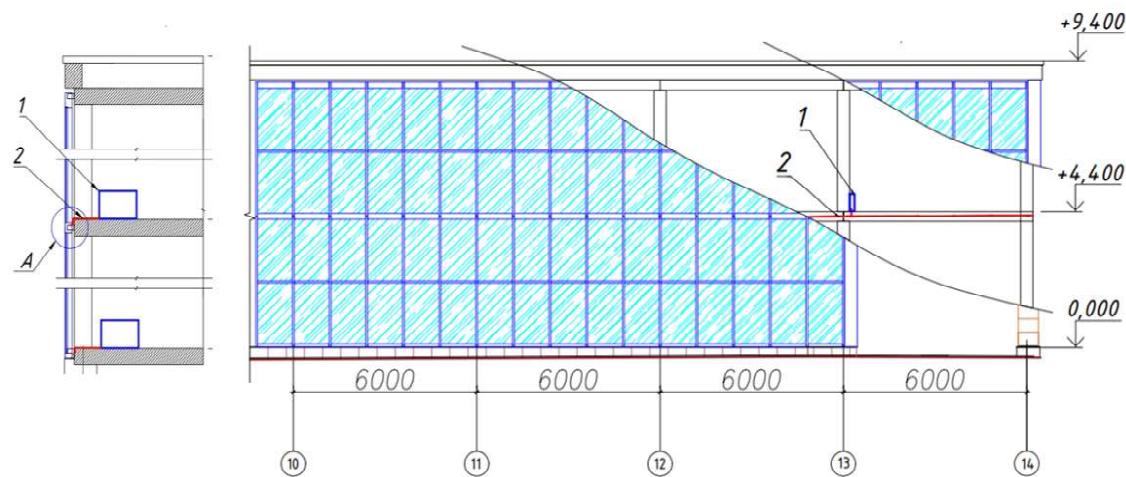


Рисунок 6 – Реализация автоматизированной вакуумной теплоизоляции светопрозрачных ограждающих конструкций на примере выставочного павильона: 1 – вакуумный распределительный узел; 2 – вакуумный трубопровод.

Схемы вакуумного распределительного узла с компонентами вакуумной теплоизоляции представлены на рисунках 7 и 8.

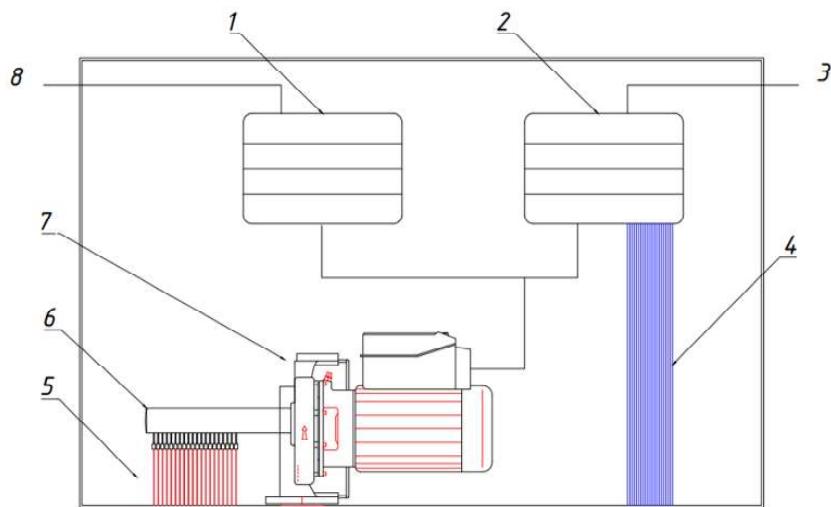


Рисунок 7 – Схема вакуумного распределительного узла управления: 1 – силовой ШР; 2 – щит автоматизации, обработки и сбора данных; 3 – к управлению системой умного дома, интерфейсная шина; 4 – шина управления и чтения данных от датчиков давления; 5 – магистраль вакуумного трубопровода; 6 – коллекторный узел низкого давления; 7 – форвакуумный насос; 8 – к силовой сети питания.

В вакуумных линиях трубопровода (рис. 8) посредством форвакуумного насоса 1 и паромасляного насоса 5 создается разрежение до уровня 10–6 мм рт. ст. Контроль величины вакуума обеспечивается соответствующими измерительными приборами, в частности вакуумным датчиком Пирани 3. Электромагнитные клапаны 4 служат для изоляции форвакуумного насоса и вакуумных панелей от общей системы вакуумирования.

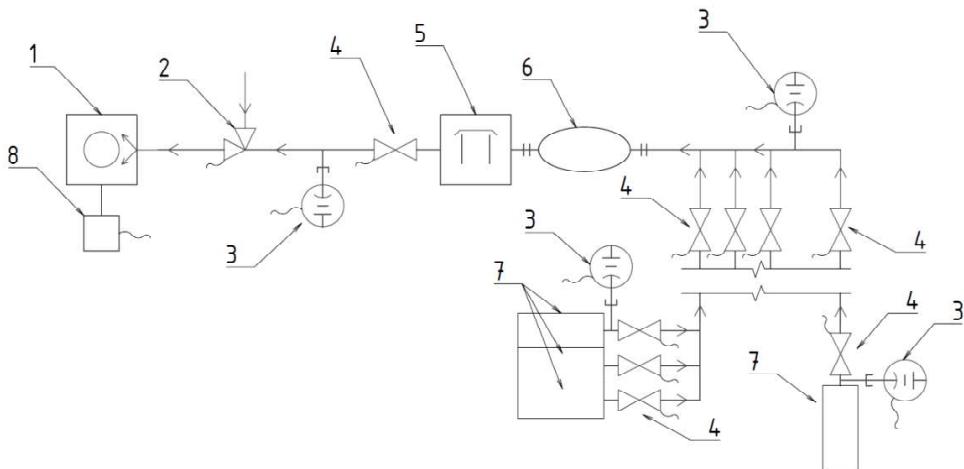


Рисунок 8 – Общая схема распределительного узла с элементами вакуумированной панели или стеклопакета:
 1 – форвакуумный насос; 2 – клапан напуска воздуха; 3 – датчик вакуума Пирани; 4 – прямодействующий клапан с электромагнитным управлением; 5 – паромасляный насос, создающий высокий вакуум, оснащенный вакуумной ловушкой; 6 – форбаллон; 7 – вакуумированные панель или стеклопакет; 8 – модуль, отвечающий за управление и обработку данных.

В рамках данного исследования были изучены возможности применения концепции «умного дома» с акцентом на интеграцию системы управления теплофизическими характеристиками ограждающих конструкций. При проектировании компонентов системы «умный дом» были определены следующие приоритетные направления автоматизации: управление вакуумной системой, мониторинг и анализ текущего состояния, управление электроклапанами системы и распределительного узла, управление ручным и автоматическим режимами, управление системой охлаждения вакуумного насоса, визуализация системы управления через web-интерфейс и локальную панель управления.

Были разработаны базовые сценарии работы системы: при превышении заданного минимального уровня вакуума в вакуумированной теплоизоляционной панели (ВТП) или вакуумированном стеклопакете (ВСП) происходит запуск системы откачки по оптимальному алгоритму. Порог вакуума устанавливается индивидуально для каждой панели или группы панелей. В случае превышения максимальной температуры второй ступени насоса активируется система охлаждения согласно заданному алгоритму. Включение/выключение потребителей системы осуществляется нажатием кнопки в web-интерфейсе для ручного управления. Система оповещает оператора о возникновении нештатных ситуаций или ошибок в работе.

Разрабатываемое решение должно полностью обеспечивать выполнение описанных сценариев. На основе вышеизложенного можно сформулировать требования к системе автоматизации: получение данных с датчиков температуры и вакуума, управление вакуумными электроклапанами каждой панели и коллекторного узла, управление системой оповещения, управление системой охлаждения по заданному алгоритму, разработка интуитивно-понятного web-интерфейса, графическое отображение данных с датчиков, возможность переключения между автоматическим и ручным режимами, возможность активации/деактивации сценариев из web-интерфейса. Силовой щит оборудования должен обеспечивать защиту от перегрузок по току при аварийной работе вакуумных насосов.

При разработке архитектуры системы решались задачи выбора контроллера для системы вакуумирования. Использование промышленных PLC возможно, но требует дополнительного оборудования для сбора и передачи данных на сервер, что увеличивает стоимость. PLC неэкономичны для домашней автоматизации, так как их цена выше, а функциональность ниже, чем у специализированных контроллеров «умного дома».

Оптимальным решением является использование проводных технологий, таких как промышленная шина RS 485 с протоколом Modbus. Для связи между компонентами системы необходима прокладка двух-, трех- или четырехжильных кабелей по принципу общей шины (BUS), что повышает надежность и скорость работы системы. Контроллеры на шине Modbus взаимодействуют по принципу «ведущий-ведомый».

В качестве многофункционального контроллера выбран Swiitch Home Base v6+ Pro, который может работать как в распределенной, так и в децентрализованной схеме управления. В децентрализованной схеме управления устройствами осуществляется через встроенный Web-интерфейс.

Для каждого вакуумного поста необходим один контроллер для создания централизованной схемы управления. При необходимости установки нескольких постов контроллеры объединяются в децентрализованную систему с возможностью группового управления оператором или автоматически. Использование Swiitch Home Base в децентрализованной схеме управления системой автоматизации вакуумирования представлено на рисунке 9.

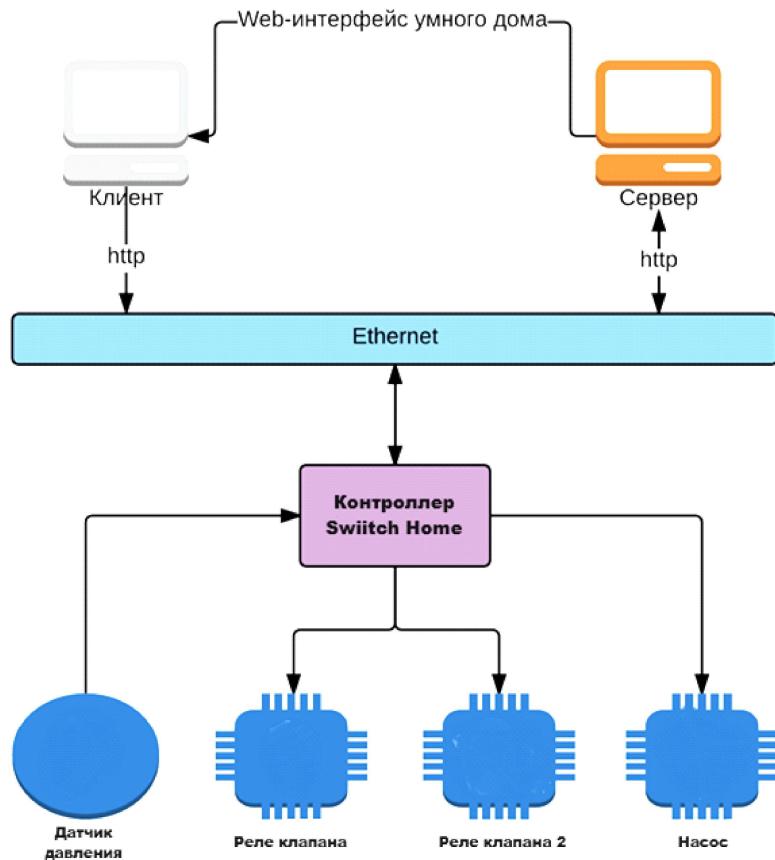


Рисунок 9 – Схема использования Swiitch Home Base с сервером для управления системой вакуумирования ограждающих конструкций.

Для анализа экологичности инновационных ограждающих систем с автоматизированной вакуумной теплоизоляцией и сопоставления их характеристик с традиционными стенами по критериям воплощенной энергии и выбросов CO_2 применялся метод оценки жизненного цикла (ОЖЦ). Этапы и модули оценки стеновых ограждений на протяжении всего их существования определялись в соответствии со стандартом EN15804:2012: этап 1 – изготовление стройматериалов, изделий и конструкций (модули A1–A3); этап 2 – строительные работы (модули A4–A5); этап 3 – эксплуатация (модули B1–B7); этап 4 – завершение срока службы (модули C1–C4).

Расчеты осуществлялись на основе разработанной методологии, включающей вычисление воплощенной энергии и выбросов углекислого газа одним квадратным метром внешней стены с учетом всех стадий ее жизненного цикла [9]. Данный подход дает возможность сопоставлять удельные экологические показатели различных конструктивных решений наружных стен, например, обладающих идентичным сопротивлением теплопередаче, соответствующим нормативным требованиям для конкретного здания.

Ключевым аспектом методологии является учет тепловых потерь через 1 м^2 стены в процессе эксплуатации с последующим расчетом выбросов CO_2 , связанных с производством энергии, компенсирующей эти потери. Для реализации методологии была использована специализированная программа «ЭКО (Экология Конструкций Ограждения)» с необходимой базой данных.

Изучение результатов расчета углеродного следа на протяжении всего жизненного цикла инновационных ограждающих конструкций с автоматизированной вакуумной теплоизоляцией продемонстрировало снижение выбросов CO_2 в сравнении со стенами, использующими обычные эффективные теплоизоляционные материалы, в диапазоне от 10 до 45 % [10; 11; 12].

ВЫВОДЫ

Предложены новаторские решения для внешних стен и прозрачных ограждающих элементов зданий, базирующиеся на автоматизированной вакуумной теплоизоляции и позволяющие увеличить теплоизоляционные характеристики различных объектов в 5–10 раз в сравнении с традиционными подходами к теплозащите. Применение автоматизированной вакуумной теплоизоляции способствует существенному сокращению выбросов углекислого газа на протяжении всего жизненного цикла зданий и сооружений.

Проведенные исследования свидетельствуют о значительной эффективности разработанной системы в контексте повышения тепловой защиты и экологической безопасности как обычных зданий, так военных и космических объектов. Будущие исследования сосредоточены на оптимизации конструкции, уменьшении затрат и расширении спектра применения данной технологии. Это предполагает разработку новых композиционных материалов, совершенствование систем управления и создание стандартизованных компонентов для упрощения процесса монтажа и технического обслуживания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kalnæs S. E., Jelle B. P. Vacuum Insulation Panel Products: a Current Review and Future Research Directions // *Applied Energy*. 2014. Vol. 116. P. 355-375. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.11.032.
2. Установка для исследования теплопроводности порошково-вакуумной и экранно-вакуумной теплоизоляций: пат. на изобретение N 2750289 Рос. Федерация. N 2020110792 / В. В. Плотников [и др.]; заявл. 14.03.2020; опубл. 25.06.2021, Бюл. N 18. 17 с.
3. Установка для исследования теплопроводности вакуумной теплоизоляции: пат. на полезную модель N 228929. Рос. Федерация. N 2024110402 / С. В. Плотникова [и др.]; заявл. 16.04.2024; опубл. 17.09.2024, Бюл. N 26. 17 с.
4. Thermal Characteristics of a Building Enclosure Structure Including ETICS with Vacuum Insulation Panels and Expanded Polystyrene / I. Mandilaras [et al.]. // *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 85. P. 654-665. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.06.053.
5. Johansson P., Hagentoft K.-E., Kalagasisidis A. S. Modernization of an Architectural Monument Made of Brick and Wood Using Vacuum Insulation Panels on the Exterior of the Facade: Measurements and Modeling // *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 73. P. 92-104.
6. Effective Thermal Conductivity of Various Fillers for Vacuum Insulation Panels / J.-S. Kwon [et al.]. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52, N. 23-24. P. 5525-5532. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.029.
7. Vos R. De, Rosbotham D., Deshat J. Open-Cell Polyurethane Foam Vacuum Panel Technology: a Composite Technology Based Entirely on Polyurethane for Vacuum Insulated Device // *Journal of Cellular Plastics*. 1996. Vol. 32, N. 5. P. 470-484. DOI 10.1177/0021955x9603200504.
8. Jelle B. P., Gustavsen A., Batens R. The Path to Highly Efficient Thermal Insulation Materials and Solutions for Buildings of Tomorrow // *Journal of Building Physics*. 2010. Vol. 34, N. 2. P. 99-123. DOI 10.1177/1744259110372782.
9. Плотникова С. В. Оценка выбросов CO₂ традиционными и инновационными ограждающими стеновыми конструкциями в течение их жизненного цикла // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. N 1 (45) (январь - март). С. 83-97. DOI 10.21869/2311-1518-2024-45-1-83-97.
10. Плотникова С. В., Бакаева Н. В. Моделирование работы динамического энергосберегающего фасада с изменямыми свойствами для повышения экологической безопасности зданий // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2023. N 4 (44). С. 40-52. DOI 10.21869/2311-1518-2023-44-4-40-52.
11. Бакаева Н. В., Плотникова С. В. Концептуальные направления создания инновационных ресурсосберегающих биопозитивных ограждающих конструкций // Инновации в строительстве-2023: матер. междунар. науч.-практ. конф. (Брянск, 06-08 апреля 2023 года). Брянск: Изд-во БГИТУ, 2023. С. 82-84. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_54043076_84305703.pdf (дата обращения: 16.03.2025). EDN ICKBDI.
12. Плотникова С. В. Динамические фасады и ограждающие конструкции зданий с изменяемыми и управляемыми свойствами: научная монография. Брянск: Брянский инженерно-технологический университет, 2025. 135 с.

REFERENCES

1. Kalnæs, S.E., and Jelle, B.P. (2014), "Vacuum Insulation Panel Products: a Current Review and Future Research Directions", *Applied Energy*, vol. 116, pp. 355-375. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.11.032.
2. Plotnikov, V.V., Grishin, R.V., Voschilo, O.G., Plotnikova, S.V. and Kuznetsov, A.S., Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bryansk State University of Engineering and Technology" (2021), *Ustanovka dlya issledovaniya teplopovodnosti poroshkovovo-vakuumnoj i e'kranno-vakuumnoj teploizolyacij* [Installation for thermal conductivity research of powder-vacuum and screen-vacuum thermal insulation], Federal Service for Intellectual Property, Bryansk, RU, Pat. N 2750289.
3. Plotnikova, S.V., Kuznetsov, A.S., Plotnikov, V.V., Grishin, R.V. and Voschilo, O.G., Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bryansk State University of Engineering and Technology" (2024), *Ustanovka dlya issledovaniya teplopovodnosti vakuumnoj teploizolyacii* [Installation for the study of the thermal conductivity of vacuum insulation], Federal Service for Intellectual Property, Bryansk, RU, Pat. N 228929.

4. Mandilaras, I., Atsonios, I., Zannis, G. and Funti, M. (2014), "Thermal Characteristics of a Building Enclosure Structure Including ETICS with Vacuum Insulation Panels and Expanded Polystyrene", *Energy and Buildings*, vol. 85, pp. 654-665. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.06.053.
5. Johansson, P., Hagentoft, K.-E. and Kalagasisidis, A.S. (2014), "Modernization of an Architectural Monument Made of Brick and Wood Using Vacuum Insulation Panels on the Exterior of the Facade: Measurements and Modeling ", *Energy and Buildings*, vol. 73, pp. 92-104.
6. Kwon, J.-S., Yang, C., Jung, H. and Song, Tae-Ho (2009), "Effective Thermal Conductivity of Various Fillers for Vacuum Insulation Panels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 23-24, pp. 5525-5532. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.029.
7. De, Vos R., Rosbotham, D. and Deshat, J. (1996), "Open-Cell Polyurethane Foam Vacuum Panel Technology: a Composite Technology Based Entirely on Polyurethane for Vacuum Insulated Device", *Journal of Cellular Plastics*, vol. 32, no. 5, pp. 470-484. DOI 10.1177/0021955x9603200504.
8. Jelle, B.P., Gustavsen, A. and Batens, R. (2010), "The Path to Highly Efficient Thermal Insulation Materials and Solutions for Buildings of Tomorrow", *Journal of Building Physics*, vol. 34, no. 2, pp. 99-123. DOI 10.1177/1744259110372782.
9. Plotnikova, S.V. (2024), "Assessment of CO₂ Emissions from Traditional and Innovative Enclosing Wall Structures During their Life Cycle", *Biosfernaya Sovmestimost': Chelovek, Region, Texnologii*, no. 1(45) (January - March), pp. 40-52. DOI 10.21869/2311-1518-2023-44-4-40-52.
10. Plotnikova, S.V. and Bakaeva, N.V. (2023), "Modeling the Operation of a Dynamic Energy-Saving Facade with Variable Properties to Improve the Environmental Safety of Buildings", *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology*, no. 4(44), pp. 61-73. DOI 10.21869/2311-1518-2023-44-4-61-73.
11. Bakaeva, N.V. and Plotnikova, S.V. (2023), "Conceptual Directions for the Creation of Innovative Resource-Saving Biopositive Enclosing Structures", *mater. mezhunar. nauch.-prakt. konf.* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conf.], *Innovacii v stroitel'stve-2023* [Innovations in construction-2023], Bryansk, Russia, 06-08 April 2023, pp. 82-84, available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_54043076_84305703.pdf (Accessed 16 March 2025). EDN ICKBDI.
12. Plotnikova, S.V. (2025), *Dinamicheskie fasady i ogranzhdayushchie konstrukcii zdanij s izmenyaemyimi i upravlyayemyimi svojstvami* [Dynamic facades and building envelopes with variable and controllable properties]: scientific monograph, Bryansk University of Engineering and Technology, Bryansk, Russia.

Информация об авторах

Плотникова Светлана Валерьевна – инженер-архитектор; преподаватель кафедры строительного производства Брянского государственного инженерно-технологического университета, Брянск, Россия. Научные интересы: повышение энергоэффективности и экологической безопасности зданий. Финалист и победитель конкурса «УМНИК» в номинации «Ресурсосберегающая энергетика». Лауреат конкурса НИИ строительной физики академии архитектуры и строительных наук (специальный приз журнала «Изобретатель и рационализатор»).

Гришин Роман Валерьевич – генеральный директор Инновационных строительных технологий, Москва, Россия; аспирант кафедры строительного производства Брянского государственного инженерно-технологического университета, г. Брянск, Россия. Научные интересы: повышение энергоэффективности и экологической безопасности зданий.

Плотников Валерий Викторович – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой строительного производства Брянского государственного инженерно-технологического университета, Брянск, Россия; Почетный строитель России. Научные интересы: разработка композиционных материалов, изделий и конструкций с заданными эксплуатационными свойствами.

Кузнецов Александр Сергеевич – инженер Инновационных строительных технологий, Москва, Россия; аспирант кафедры строительного производства Брянского государственного инженерно-технологического университета, г. Брянск, Россия. Научные интересы: повышение энергоэффективности и экологической безопасности зданий.

Вошило Олег Геннадьевич – главный инженер Инновационных строительных технологий, Москва, Россия; аспирант кафедры строительного производства Брянского государственного инженерно-технологического университета, г. Брянск, Россия. Научные интересы: повышение звукоизоляции и экологической безопасности зданий.

Information about the authors

Plotnikova Svetlana V. – an architectural engineer, lecturer at the Department of Construction Production, Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk, Russia. Scientific interests: improving energy efficiency and environmental safety of buildings. Finalist and winner of the «SMART GUY» contest in the nomination «Resource-saving energy». Winner of the competition of the Research Institute of Building Physics of the Academy of Architecture and Building Sciences (special prize of the magazine «Inventor and Innovator»).

Grishin Roman V. – general Director of Innovative Construction Technologies, Moscow, Russia; a postgraduate student at the Department of Construction Production, Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk, Russia. Scientific interests: improving energy efficiency and environmental safety of buildings.

Plotnikov Valery V. – Sc. D. (Eng.), Professor; Head of the Department of Construction Production, Bryansk State University of Engineering and Technology; Honorary Builder of Russia. Scientific interests: development of composite materials, products and structures with specified operational properties.

Kuznetsov Alexander S. – engineer, Innovative Construction Technologies, Moscow, Russia; a postgraduate student at the Department of Construction Production, Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk, Russia. Scientific interests: improving energy efficiency and environmental safety of buildings.

Voshchilo Oleg G. – chief Engineer of Innovative Construction Technologies, Moscow, Russia; a postgraduate student at the Department of Construction Production, Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk, Russia. Scientific interests: improving the sound insulation and environmental safety of buildings.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.03.2025; одобрена после рецензирования 18.04.2025; принята к публикации 25.04.2025.
The article was submitted 20.03.2025; approved after reviewing 18.04.2025; accepted for publication 25.04.2025.