

Применение легкобрасываемых сэндвич-панелей для защиты производственных зданий в условиях арктического климата

Евгений Степанович Рассказов¹✉, Дмитрий Александрович Корольченко²

¹ Песко Энергия и Ресурсы АО, г. Москва, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Предмет исследования. Усовершенствование защиты и разработка инновационного решения с применением легкобрасываемых конструкций из сэндвич-панелей для защиты зданий от внутренних аварийных взрывов в условиях климатического пояса Арктической зоны.

В результате исследования установлено влияние разницы температур окружающей среды снаружи здания/сооружения (от -40°C и ниже) и внутри здания/сооружения (от $+18^{\circ}\text{C}$ и выше) на состояние легкобрасываемых конструкций в местах установки разрушаемых узлов крепления (РУК), а именно: выявлено образование наледи и конденсата в местах стыковочных соединениях ЛСК, а также РУК, что негативно влияет на эффективность работоспособности системы защиты здания от внутренних аварийных взрывов.

Цель. Повышение взрывоустойчивости зданий/сооружений с применением легкобрасываемых конструкций (ЛСК) из сэндвич-панелей с учетом климатических воздействий Арктической зоны в случае образования внутреннего избыточного давления.

Задачи:

- анализ производства и применения сэндвич-панелей как легкобрасываемых конструкций в России и за рубежом;
- анализ литературных и патентных источников существующих ЛСК, применяемых в Арктической зоне;
- анализ влияния экстремально низких температур на работу ЛСК, в частности на работу РУК;
- синтезирование объектов исследования.

Аналитическая часть. Развернутое представление результатов исследования (анализа).

Выводы. Обоснована ценность полученных результатов и предложены рекомендации по их использованию. Применяемые в настоящее время ЛСК доказали свою эффективность в климатических условиях, не относящихся к Арктической зоне, однако для применения в экстремальных климатических условиях Арктики требуется дальнейшая адаптация и усовершенствование данных ЛСК.

Ключевые слова: стеновой блок; предохранительные конструкции; экстремально низкая температура; обледенение; эвакуационный выход; тушение пожара; неблагоприятные погодные условия; аварийная эвакуационная точка; аварийный проем

Для цитирования: Рассказов Е.С., Корольченко Д.А. Применение легкобрасываемых сэндвич-панелей для защиты производственных зданий в условиях арктического климата // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 5. С. 26–50. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.26-50

✉ Рассказов Евгений Степанович, e-mail: evgenyples@hotmail.com

Application of lightweight removable sandwich panels for protection of industrial buildings in Arctic climate conditions

Evgenii S. Rasskazov¹✉, Dmitriy A. Korolchenko²

¹ JSC "PESCO Energy & Resources", Moscow, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Improvement of protection and development of an innovative solution using lightweight removable panels made of sandwich panels to protect buildings from internal emergency explosions in the climatic zone of the Arctic region was carried out.

As a result of the research, the influence of the temperature difference between the external environment (from -40°C and below) and the interior of the building/structure (from $+18^{\circ}\text{C}$ and above) on the condition of lightweight removable panels at the installation points of destructible frame fastening unit (DFFU) was established. Specifically, ice formation and condensation were identified at the joints of the lightweight removable panels (LRP), as well as inside the DFFU, which negatively affects the efficiency and performance of the building protection system against internal emergency explosions.

Aim. To enhance the explosion resistance of buildings/structures through the use of lightweight removable panels made of sandwich panels, considering the climatic impacts of the Arctic region in case of internal over-pressure formation.

Objectives:

- analysis of the production and application of sandwich panels as lightweight removable structures in Russia and abroad;
- review of literature and patent sources on existing LRP used in the Arctic region;
- analysis of the impact of extremely low temperatures on the performance of LRP, particularly on the functionality of the DFFU;
- synthesis of research objects.

Analytical Section. A detailed presentation of the research results (analysis).

Conclusions. The value of the obtained results is substantiated, and recommendations for their implementation are provided. The lightweight removable panels (LRP) currently in use have proved their efficiency in climatic conditions outside the Arctic zone; however, further adaptation and improvement of these LRP are required for application in the extreme climatic conditions of the Arctic.

Keywords: wall block; protective structures; extremely low temperature, icing; emergency exit; fire suppression; adverse weather conditions; emergency opening; emergency aperture

For citation: Rasskazov E.S., Korolchenko D.A. Application of lightweight removable sandwich panels for protection of industrial buildings in Arctic climate conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(5):26-50. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.26-50 (rus).

✉ Evgenii Stepanovich Rasskazov, e-mail: evgenyples@hotmail.com

ВВЕДЕНИЕ

Узкоспециализированная область исследования легко-сбрасываемых конструкций (ЛСК) является одной из важных областей в строительстве опасных производственных объектов (ОПО), что включает в себя разработку новых материалов, методов монтажа/демонтажа, связанных с защитой здания. Под защитой подразумевается способность здания противостоять разрушениям при образовании избыточного давления внутри здания, а также выдерживать воздействие экстремально низкой температуры внешней окружающей среды, включая разницу внешней и внутренней температуры. Исследования теплотехнических характеристик здания и их важности во всех аспектах проводились многими исследователями, для примера выделим работу [1], где авторы предлагают решения сложных задач по тепловому комфорту гражданских зданий, а именно устранение жары и влажности, приводят пример неэффективных практик по формированию защиты здания от влияния температур и влаги.

Экстремальные климатические условия Арктической зоны оказывают негативное влияние на работоспособность защиты здания, в частности на ЛСК. Так, в стыковочных местах разрушаемых узлов крепления (РУК) при наружной температуре -40°C (и ниже) и внутренней температуре $+18^{\circ}\text{C}$ (и выше) происходит промерзание и образование на поверхности наледи/конденсата, что делает механизм РУК мало-

эффективным и при длительном воздействии приведет его к повреждению.

Исследования применения сэндвич-панелей в качестве ЛСК в современном строительстве зданий опасного производственного объекта (ОПО) дают возможность поиска и разработки инновационных решений по защите зданий/сооружений, которые позволяют строить и эксплуатировать производственные здания/сооружения с высокой категорией взрывопожарной и пожарной опасности более эффективно, безопасно и экономически выгодно.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Вводная часть

Созданные в 1930 г. в США сэндвич-панели получили широкую популярность в мире для строительства жилья, а со временем их стали применять в строительстве производственных объектов [2]. Так, в 80-х годах в СССР запустили первые производственные объекты из сэндвич-панелей собственного производства [3].

На сегодняшний день в строительстве производственных зданий любых размеров существует значительное количество разного типа стеновых сэндвич-панелей с характеристиками теплозащиты и ЛСК, которые также применяются разными странами при эксплуатации промышленных предприятий; и прогноз показывает, что применение сэндвич-панелей с полимерным наполнителем в производстве будет расти с каждым годом, продажа сэндвич-

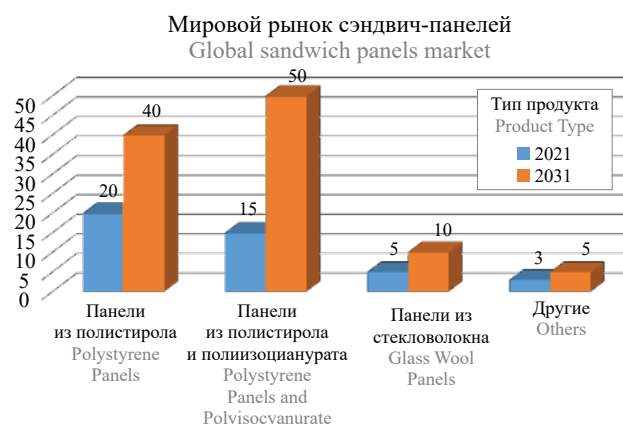


Рис. 1. Сегмент полистирольных панелей принес наибольший доход рынку в 2021 г.

Fig. 1. The polystyrene panels segment brought the highest revenue to the market in 2021

панелей в 2021 г. показала высокий рост (рис. 1), а к 2030 г. продажа вырастет в два раза, что делает сэндвич-панели самым популярным строительным материалом производственных зданий и сооружений [4].

География применения сэндвич-панелей обширна, ведь производственные объекты находятся в разных климатических поясах Земли, включая полярный/субполярный пояса, а границы полярного и субполярного поясов можно увидеть на схематической карте климатических поясов Земли [5]. И в таких регионах, как правило, сэндвич-панели используются для наружной обшивки стены здания/сооружения, либо в качестве стеновой панели здания/сооружения из легких металлических конструкций (ЛМК).

Применение стеновых сэндвич-панелей в народном хозяйстве нашей страны для защиты установок/оборудования от экстремально низких температур и снежных буранов облегчило организациям, эксплуатирующим эти объекты, осуществление обслуживания технологического оборудования, находящегося внутри здания, при этом защищая персонал от холода и риска обморожения.

Но наряду с защитными характеристиками здания/сооружения имеется риск образования газопаровоздушной смеси (ГПВС) внутри здания в результате аварийного пролива горючей жидкости или аварийной утечки горючих газов из газопровода или технологического оборудования, так как стеновые панели из сэндвич-панелей имеют хорошую герметичность и практически отсутствие воздушных потоков, что может привести к взрыву с последующим разрушением здания, повреждением технологического оборудования и гибели людей. Поэтому еще на этапе строительства здания закладываются системы защиты, включая вентиляцию, пожаротушение и пожарную сигнализацию, а при эксплуатации данные системы

вводят в эксплуатацию и поддерживаются в рабочем исправном состоянии.

В работе регионом исследования приняли считать территории континентальной части Арктической зоны (Арктики) Российской Федерации, установленные согласно Указу¹ (рис. 2).

На сегодняшний день в строительстве быстровозводимых сооружений и зданий применяются легкие металлоконструкции (ЛМК), в работе [6] изложен подход для строительства быстровозводимых сооружений из ЛМК с применением специальных программ проектирования зданий из ЛМК. Как показала практика масштаба применения ЛМК, то подобные конструкции подходят для защиты уникального высокотехнологичного оборудования и установок от экстремально низких температур окружающей среды. Основными несущими элементами сооружений из ЛМК являются стальной прокатный профиль, как правило двутавровый, а в качестве конструктивных элементов применяются: балки, фермы, колонны, стойки и т.д.

Стеновые сэндвич-панели пока не являются несущим конструктивным элементом здания, их используют только для стеновой обшивки здания из ЛМК, но в настоящее время проводятся исследования со стеновыми сэндвич-панелями, которые отражены в работах [7], введено понятие «силовая сэндвич-панель поэлементной сборки»; исследователи продолжают дальнейшее изучение поиска новых решений, придания стеновым панелям жесткости, сравнимой с бетонными изделиями. Также имеются некоторые достижения исследований в области придания жесткости сэндвич-панелям: так исследователи [8] доказали, что нагрузка на линейный угловой прогиб из сэндвич-панели может выдерживать значительно большую нагрузку, учитывая небольшой размер конструкции (рис. 3).

Сооружения/здания из ЛМК, обшитые стеновыми сэндвич-панелями, применяются не только в России, но и в зарубежных странах, расположенных как в южных широтах, так и в северных широтах областей Земли с повышенной сейсмической опасностью, авторы [9] исследовали влияние боковой жесткости колонн и сэндвич-панелей при горизонтальных нагрузках, а именно на сейсмостойкость конструкции в полной сборке, таким образом подтверждая, что стеновые панели из сэндвич-панелей в сборке с железобетонными конструкциями представляют собой конструкцию, способную перераспределять сейсмические силы. Исследователями [10] проведены испытания сэндвич-панелей с бетонным наполнителем из материала, имеющего эффективное термиче-

¹ О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 02.05.2014 № 296.

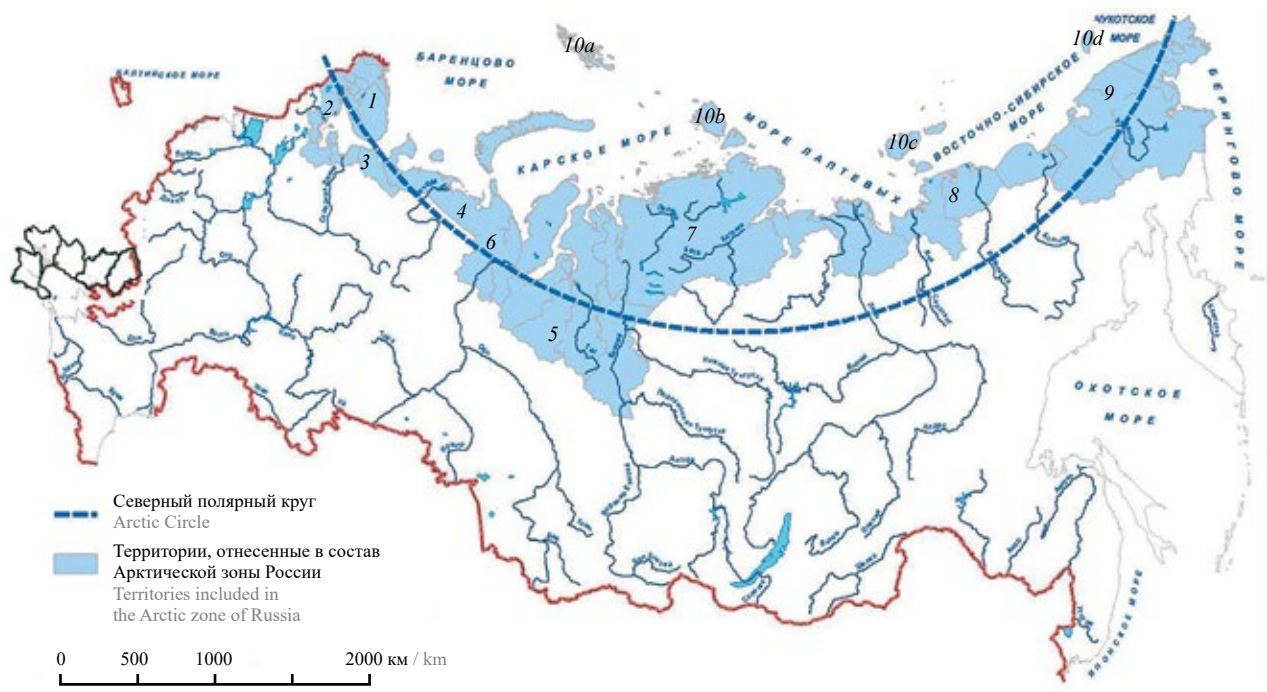


Рис. 2. Арктическая зона Российской Федерации. Регионы: 1 — Мурманская область; 2 — Республика Карелия; 3 — Архангельская область; 4 — Ненецкий автономный округ; 5 — Ямало-Ненецкий автономный округ; 6 — Республика Коми; 7 — Красноярский край; 8 — Республика Саха (Якутия); 9 — Чукотский автономный округ; 10 — земли и острова, расположенные в Северном Ледовитом океане: 10a — Земля Франца-Иосифа; 10b — Северная Земля; 10c — Новосибирские острова; 10d — остров Врангеля

Fig. 2. Arctic zone of the Russian Federation. Regions: 1 — Murmansk region; 2 — Republic of Karelia; 3 — Arkhangelsk region; 4 — Nenets Autonomous District; 5 — Yamalo-Nenets Autonomous District; 6 — Komi Republic; 7 — Krasnoyarsk Region; 8 — Sakha Republic (Yakutia); 9 — Chukotka Autonomous District; 10 — lands and islands located in the Arctic Ocean: 10a — Franz Josef Land; 10b — Severnaya Zemlya; 10c — The New Siberian Islands; 10d — Wrangel Island

ское сопротивление внешней окружающей среды, они представили обзор пяти наиболее распространенных в мире сборных стеновых панелей: легкие деревянные каркасные панели (LTF), легкие металлические каркасные панели (LSF), структурно-изолированные панели (SIP), панели из поперечно-клееной древесины (CLT) и сборные бетонные сэндвич-панели (PCSP). Данные исследования показали практическое применение сэндвич-панелей как материала для возведения зданий.

Предложение обработать поверхности металла конструкций здания/сооружения для защиты от



Рис. 3. Угловой прогиб из сэндвич-панели под нагрузкой [8]
Fig. 3. Angular deflection of a sandwich panel under load [8]

негативного воздействия окружающей среды в виде осадков (коррозии), а также об дополнительном эффекте теплопроводности отражено в работе [11]; например, использование подложки с PVD-покрытием, которая имеет тонкую пленку с заметной коррозионной/износостойкостью, большей толщины, поможет увеличить срок службы защищаемого изделия. Подобные исследования продолжаются, поэтому ожидаем результаты.

Также исследования в области звукоизоляции/шумоизоляции с применением сэндвич-панелей с сердечником из минеральной ваты показали лучшие положительные результаты [12], при этом улучшение звукоизоляции сэндвич-панелей обеспечивается без существенного увеличения их массы и толщины.

Как ранее было сказано, оптимальным решением защиты от воздействия экстремально низкой температуры является простое и надежное решение: применение стеновых сэндвич-панелей с соответствующими теплофизическими характеристиками. Для наглядности картины влияния неблагоприятных погодных условий представлен рис. 4, где показан производственный объект, подвергшийся снежному намету и обледенению. Подобные ситуации наблюдаются повсюду: как на гражданских, так и на производствен-



Рис. 4. Фото производственного объекта в Арктике. Снежные наметы на крыше, стенах, окнах

Fig. 4. Photo of a production facility in the Arctic. Snowdrifts on the roof, walls, windows

ных объектах, расположенных в регионах Арктической зоны, особенно в холодный период года.

Применение сэндвич-панелей в народном хозяйстве

По итогам геологоразведки в Арктике, а именно в Ямало-Ненецком автономном округе, Республике Саха (Якутия), Республике Коми имеются гигантские нефтегазоконденсатные месторождения, на которых ведется интенсивное строительство заводов по добыче газа и нефти, сжижение природного газа крупными переработчиками (лицензиатами), такими как АО «Газпром», ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Новатэк» и т.п. В целом в России успешно функционируют тридцать газоперерабатывающих заводов и большое количество газохимических комбинатов. В работе [13] отражены исследования и найдено подтверждение тому, что от лицензиатов требуется качественный подход к обеспечению высокого уровня безопасности на всех этапах реализации проектов нефтегазового сектора производства, потому что разведка, строительство и эксплуатация таких объектов должны сопровождаться максимальной безопасностью для людей и экологии, а следовательно, имеют приоритетную основу. Обеспечение безопасности должно быть не только от холода и других опасных и вредных факторов неблагоприятных погодных условий, но также от аварийного взрыва и его последствий.

Перспективы развития нефти, газа, газового конденсата в Арктике также находят подтверждение в работе [14], в которой предлагается применять исследования компаниям и аналитикам нефтегазового сектора, заинтересованным в консолидированной информации о перспективах реализации нефтегазовых проектов в Арктике. На рис. 5 показаны основные

места добычи нефти, газа и конденсата Ямало-Ненецкого автономного округа.

Для успешной добычи нефти и газа или нефтегазового конденсата еще на этапе строительства возникает потребность в обеспечении защиты здания/оборудования и людей от возможного последствия пролива/утечки легковоспламеняющейся жидкости (ЛВЖ) и горючих газов (ГГ) в здании. В Российской Федерации имеются определенные правила и требования по защите производственных зданий/сооружений от аварийных локальных взрывов внутри помещений.

Требования СП 56.13330.2021² обязывают лицензиата на этапе проектирования ОПО принять архитектурно-конструктивные решения и предусмотреть мероприятия, направленные на обеспечение безопасности людей, экологии, защиту здания/сооружения при дальнейшей эксплуатации, а сами требования к данным мероприятиям изложены в СП 12.13130.2009³. Следует отметить, что не стало исключением и обеспечение безопасности производственной деятельности на ОПО в Арктической зоне России.

Расположенные на ОПО по подготовке нефти/газа производства химической продукции из углеводородов производственные здания и сооружения относятся к категории взрывоопасности А или Б. Данная категория присваивается в соответствии с требованиями Федерального закона⁴, а критерием определения категории А или Б является температура вспышки ЛВЖ и ГГ; таким образом, категория А объекту присваивается при температуре вспышки +28 °С и менее, категория Б — +28 °С и более. При этом объекты категории А или Б должны иметь вероятность образования избыточного давления (ΔP) или аварийного взрыва в помещении величиной ≥ 5 кПа (см. п. 5.1, табл. 1, СП 12.13130.2009⁵); соответственно, данное производство по характеру производственного процесса относится к взрывопожароопасному оборудованию и в случае аварийного пролива/утечки ЛВЖ или ГГ возникает высокая вероятность аварийного взрыва. Так, в п. 6.2.30, СП² при категориях помещений А или Б следует предусматривать ЛСК. Площадь ЛСК при отсутствии расчетных данных должна составлять не менее 0,05 м² на 1 м³ объема помещения категории А и не менее 0,03 м² — помещения категории Б.

При учете нормативно-технических требований СП² лицензиатом при строительстве сооружений

² СП 56.13330.2021. Производственные здания.

³ СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

⁴ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

⁵ СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.



Рис. 5. Места разработки крупных месторождений нефти и газа Ямало-Ненецкого автономного округа: 1 — завод Ямал СПГ Саус-Тамбейское месторождение (Новатэк — ЯНАО); 2 — ГПС Бованенковское и Харасавэйское НГК месторождения (Газпромнефть — ЯНАО); 3 — Ямбургское НГК месторождение АО «Газпром-добыча Ямбург»; 4 — Западно-Таркосалинского и Ен-Яхинского НГК месторождение (Газпромнефть — ЯНАО); 5 — Уренгойское НГК месторождение (Газпромнефть — ЯНАО)

Fig. 5. Oil and gas development sites in the Yamalo-Nenets Autonomous District: 1 — Yamal LNG Plant South Tambeystkoye field (Novatek — YNAD); 2 — SFS Bovanenkovskoye and Kharasaveyskoye OGC fields (Gazprom Neft — YNAD); 3 — Yamburgskoye OGC field of JSC “Gazprom dobycha Yamburg”; 4 — Zapadno-Tarkosalinskoye and Yen-Yakhinskoye OGC fields (Gazprom Neft — YNAD); 5 — Urengoyevskoye OGC field (Gazprom Neft — YNAD)

ОПО ожидается, что ЛСК вскроют проем для сброса давления уже на уровне образования ΔP до 5 кПа и при этом обеспечат защиту несущих металлоконструкций здания, оборудования/установок от последствий аварийного взрыва.

Учитывая величину материального ущерба от последствий аварийного взрыва, появляется устойчивое подтверждение экономической эффективности применения ЛСК в качестве ограждающих конструкций зданий ОПО, что подтверждается в работах [15], с тем условием, что лицензиат учтет не только прямой, но и косвенный ущерб от аварии.

Конструктивные особенности стеновых сэндвич-панелей и ЛСК

Здания и сооружения, возводимые в Арктической зоне, имеют высокий коэффициент теплоизоляционных свойств, которые формируют принцип среды обитания в Арктическом регионе [16]. Важной чертой современных стеновых сэндвич-панелей являются высокие теплоизоляционные свойства, а также способность выдерживать обильные снегопады, ледяные бури и сильные ветра, так как конструкция сэндвич-панели представляет собой металлические рифленные пластины, связанные с внутренним наполнителем из газонаполненной пластмассы или минеральной ваты, которые являются основными изоляционными наполнителями при производстве стеновых сэндвич-панелей и широко применяются как в России, так и в зарубежных странах. Утеплитель/наполнитель (минеральная вата или газонаполненная пластмасса) крепятся на внешней и внутренней металлической облицовке при помощи специального клея, состав которого должен минимально содержать горючие и токсичные вещества (рис. 6).

Теплоизоляционные и технические характеристики газонаполненных пластмасс и минеральной ваты детально изложены в научной работе [17]. Следует подчеркнуть, что коэффициент теплопроводности

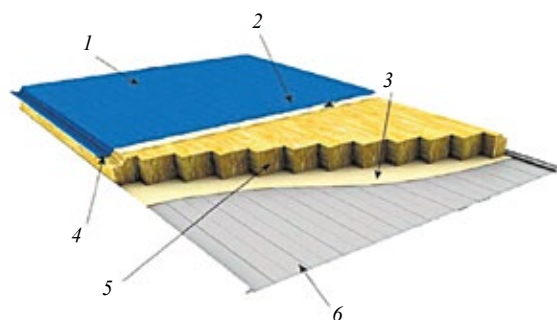


Рис. 6. Общая конструкция стеновой сэндвич-панели: 1 — защитное покрытие; 2 — тонколистовая сталь; 3 — клеящий слой; 4 — замок; 5 — наполнитель (термоизоляционный материал); 6 — тонколистовая сталь

Fig. 6. General design of wall sandwich panel: 1 — protective coating; 2 — thin sheet steel; 3 — adhesive layer; 4 — lock; 5 — filler (thermal insulation material); 6 — thin sheet steel

газонаполненных пластмасс по расчетам [17] находится в пределах показателей 0,019–0,025 Вт/(м·К), а коэффициент теплопроводности минеральной ваты 0,052–0,058 Вт/(м·К) (табл. 1).

Газонаполненные пластмассы являются одними из самых распространенных технологичных полимерных наполнителей стеновых сэндвич-панелей, которые делятся на следующие марки: пенополивинилхлорид (PVC), пенополиуретан (PU), пенополиизоцианурат (PIR), пенополистирол вспененный (SP), пенополистирол экструдированный (XPS); такие определения также применяют в своей работе авторы [18] и подтверждают высокие свойства теплозащиты и их способность выдерживать экстремально критические температуры окружающей среды: от –65 до +110 °С. Опираясь на свои исследования [18], авторы заключили, что утеплители группы газонаполненных пластмасс имеют высокую горючесть Г1 ... Г4, если не применять в качестве наполнителя инертные газы.

В работе [19] проанализировано появление на рынке нового наполнителя для сэндвич-панелей — пенополиизоцианурата. Пенополиизоцианурат, который по горючести ниже, чем пенополиуретан (Г1, т.е. слабогорючий), не поддерживает горение и затухает самостоятельно при отсутствии источника пламени.

Таблица 1. Сравнительная таблица коэффициентов теплоизоляции материалов [17]

Table 1. Comparative table of thermal insulation coefficients of materials [17]

Утеплитель Insulation	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)
Пенополиуретан Polyurethane foam	40...160	0,019...0,025
Минеральная вата Mineral wool	55...150	0,052...0,058

Пенополиизоцианурат является модификацией пенополиуретана и производится путем экструзии при взаимодействии двух компонентов: полиола и изоцианурата.

Проведены работы [20] по исследованию теплофизических свойств полистиролсодержащих пенопластов, проведено их старение при воздействии ультрафиолетового света путем погружения в воду. Авторами доказано, что водопоглощение газонаполненной пластмассы и ультрафиолет приводят к деструкции и изменению коэффициента теплопроводности полистиролсодержащих пенопластов, другими словами, увеличивается теплопроводность за счет присутствия влаги и изменения физических свойств под воздействием ультрафиолета.

Исследования [21] доказывают, что стеновые сэндвич-панели с наполнителем из пены PVC выдерживают ударные нагрузки 5 и 10 Дж при температурах от +23 до –70 °С, что характерно для температуры окружающей среды Арктики. Но также в [21] был выявлен ряд недостатков в моделях исследования, а именно: при температуре от –20 до –70 °С образцы стеновых сэндвич-панелей показали низкую ударную прочность, нежели чем образцы при положительной температуре при таких же ударных нагрузках, а именно: если на данные модели сэндвич-панелей будет ударное воздействие, то деформация может привести к неисправностям стыковочных соединений и в РУК.

Наполнители из газонаполненных пластмасс в строительстве зданий ОПО рекомендуется применять со свойствами самозатухания и не поддерживающими горение, но данное требование не является обязательным, а носит рекомендательный характер. Метод и методика проведения испытаний эксплуатационных характеристик по теплофизическим показателям утеплителей/наполнителей сэндвич-панелей производится по Межгосударственному стандарту⁶. И производитель стеновых сэндвич-панелей, расположенный на территории Российской Федерации, должен строго придерживаться данного стандарта.

Минеральная вата на сегодняшний день является самым высокотехнологичным и распространенным утеплителем стеновых сэндвич-панелей, из которой производятся плиты минераловатные (MW). Минеральная вата — это название группы утеплителей, изготавливаемых на основе минералов, имеет высокие показатели эффективного термического сопротивления окружающей среды. Детально описан состав теплоизоляционного материала из минеральной ваты и особенности конструкций с минеральной

⁶ ГОСТ 32312–2011 (EN 14706:2005). Изделия теплоизоляционные, применяемые для инженерного оборудования зданий и промышленных установок. Метод определения максимальной рабочей температуры : Межгосударственный стандарт.

ватой в [22], также здесь указаны методы и процессы производства минеральной ваты. Следует отметить, что авторами [22] исследованы теплозащитные свойства минеральной ваты, которые в значительной степени зависят не только от качества производства минеральной ваты, но и самой ее структуры, а также немаловажным является качество монтажа.

Исследования свойств и состава минеральной ваты в качестве утеплителя и наполнителя сэндвич-панелей отражены в [23]. В ходе исследования проведены натурные испытания в лабораторных условиях, что позволило выявить скорость распространения горения, выгорания и тления минеральной ваты в условиях пролива/розлива ЛВЖ (дизельное топливо, бензин, машинное масло и т.п.). По итогам испытаний было установлено, что минеральная вата обладает высокой гигроскопичностью и пролитый ЛВЖ легко впитался в минеральную вату, а следовательно, дальнейшее поддержание горения и его распространение как в горизонтальном, так и вертикальном направлении по конструкции относится к недостатку данного утеплителя, также к недостатку можно отнести слеживание минеральной ваты, что делает ее недолговечной и малоэффективной с течением времени.

Работы исследователей [24] также подтверждают высокие характеристики теплопроводности минеральной ваты, но при этом связующее вещество минваты является источником передачи тепла при воздействии на нее температуры, поэтому исследователи предлагают предварительное прогревание минеральной ваты температурой $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ для выпаривания или кристаллизации связующего вещества, но тем не менее натурные испытания показали, что наполнитель в сэндвич-панелях из минеральной ваты является менее безопасным при пожаре, а также приемлемым для применения в качестве термоизоляции здания от воздействия температуры внешней окружающей среды.

Проведенное сравнение утеплителей [25] по физическим характеристикам позволяет сравнить следующие показатели: газонаполненные пластмассы плотностью 100 кг/м^3 с коэффициентом теплопроводности $0,041$ при толщине 135 мм и минеральную вату плотностью 75 кг/м^3 с коэффициентом теплопроводности $0,058$ при толщине 175 мм . Исходя из сравнения, следует вывод, что газонаполненные пластмассы имеют ниже теплопроводность относительно минеральной ваты, но к недостаткам газонаполненных пластмасс относится их горючесть, которая имеет группу от Г1 до Г4, а также дымообразующую способность от Д1 до Д3, что в данном сравнении делает утеплитель из минеральной ваты более безопасным для людей, здания/сооружения, оборудования и экологии в случае пожара. Поэтому утеплитель из мине-

ральной ваты является самым распространенным утеплителем в производстве стеновых сэндвич-панелей, такого же вывода придерживается автор в работе [26] по исследованию качества сэндвич-панелей в области пожарной безопасности зданий.

Исследования сэндвич-панелей по теплоизолирующим свойствам изложены в работе [27], где подтверждается безопасность применения теплоизоляционных материалов и их эстетический вид при строительстве зданий. Что касается эстетического вида, некоторые исследователи придерживаются иной точки зрения, так как постоянное воздействие ультрафиолета со временем немного меняет цвет наружной стороны сэндвич-панелей, также сэндвич-панели легко деформировать при транспортировке или монтаже.

Рассмотрены результаты научной работы [28], в которой авторы приходят к выводу, что не все наполнители сэндвич-панелей из минеральной ваты, а также газонаполненные пластмассы имеют соответствующую группу горючести НГ или Г1, а следовательно, степень огнестойкости их снижается. Эти исследования показали, что в утеплителе из минеральной ваты производитель допускает наличие в волокнах промежуточных продуктов горения, так называемых связующих веществ, в том числе фенолформальдегидные смолы, гидрофобизирующие, биоцидные добавки и т.д.; из чего следует вывод, что требуется усовершенствование системы сертификации в области определения горючести и огнестойкости изоляционных материалов, а также дополнительный контроль надзорных органов за качеством заявленных в сертификате безопасности материалов.

Автор научной работы [29] предлагает дополнительное решение по усилению термического сопротивления здания окружающей среде, а именно повышение теплоизоляционных свойств существующих сэндвич-панелей путем наложения отражательного изоляционного слоя на внутреннюю ее часть; данный отражатель будет иметь свойства фольги и высокие отражающие свойства. Авторы считают, что данное научное решение как дополнение к общей системе защиты здания может считаться эффективным, но только в совокупности со всей системой защиты здания и защитными функциями ЛСК.

Другое инновационное решение в разработке легкобрасываемых конструкций на основе сотовых поликарбонатных листов (СПЛ) изложено в работе [30], где предлагается монтаж блоков ЛСК с гибким ограждением на основе СПЛ, при этом авторы подчеркивают, что применение СПЛ толщиной 8 мм требует дополнительных исследований. В работе [30] отсутствуют исследования о влиянии

экстремально низких температур на работоспособность СПЛ.

Типы существующих ЛСК и патенты

Сэндвич-панель — это строительный материал, имеющий трехслойную структуру, состоящую из двух листов жесткого материала (металл, поливинилхлорид, магнезитовая плита) и слоя утеплителя между ними, а ЛСК — это ограждающая строительная конструкция, позволяющая освободить наружный стеновой проем при воздействии на нее аварийных нагрузок внутреннего, например дефлаграционного, взрыва (определения см. п. 3.2, 3.3, ГОСТ Р 56288–2014⁷) или волновых явлений последствий локального взрыва.

В производственных помещениях категорий А, Б по пожарной и взрывопожарной опасности следует предусматривать наружные легкобрасываемые ограждающие конструкции. В качестве ЛСК следует использовать одинарное остекление окон и фонарей. При недостаточной площади остекления допускается в качестве ЛСК использовать конструкции покрытий с кровлей из стальных, алюминиевых, хризотилцементных и битумных волнистых листов, из гибкой черепицы, металлочерепицы, хризотилцементных и сланцевых плиток и эффективного негорючего утеплителя. И, как указывалась выше (см. стр. 30), ковровая площадь ЛСК для защиты зданий при отсутствии расчетных данных должна составлять не менее 0,05 м² на 1 м³ объема помещения категории А и не менее 0,03 м² — помещения категории Б².

Исследования сэндвич-панелей показывают, что наполнитель в сэндвич-панелях из минеральной ваты является менее безопасным при пожаре, а также приемлемым для применения в качестве термоизоляции здания от воздействия температуры внешней окружающей среды. Металлическая облицовка сэндвич-панели, выполненная из низкоуглеродистой горячеоцинкованной стали с защитно-декоративным полимерным покрытием, является отличной защитой сэндвич-панели от истирания и агрессивной окружающей среды (кислотная среда, солнечное излучение — ультрафиолет, перепад температур), что доказано исследованиями, проведенными авторами в натурных испытаниях [31].

В мире процесс строительства быстровозводимых зданий из ЛМК ведется по методикам, разработанным как специализированными строительными институтами, так и строительными компаниями по их разработанным строительно-техническим условиям (СТУ). В Российской Федерации был отменен институт строительства зданий и сооружений

по СТУ⁸. Средний срок службы быстровозводимого здания из ЛМК составляет 20–30 лет, но имеются здания из сэндвич-панелей сроком службы до 50 лет. Формы сооружений и зданий могут иметь разную конфигурацию, в научной работе [32] упоминается четыре конфигурации сооружений производственного значения, такие как арочная, прямоугольная, полигональная и шаровая. Предложенные конфигурации, как правило, выполняются из облегченного стального прокатного профиля (двутавровый), выполняющего функции несущей конструкции (колонна), а в качестве конструктивных элементов применяются балки, фермы, колонны, стойки и т.д., в качестве стен — стеновые сэндвич-панели, которые крепятся по наружным граням колонн. Исследованиями [32] выявлено, что в основу применения быстровозводимых зданий/сооружений закладывается коммерческая составляющая, а в случае неправильной оценки рисков и опасностей на этапе монтажа конструкции не всегда преследуются интересы промышленной безопасности и охраны труда, что в краткосрочной перспективе является выгодным, но в долгосрочной неучтенные риски и опасности приводят к авариям и остановке производства с последующими репутационными потерями и материальными убытками.

Для решения задач по контролю за показателями микроклимата в помещениях сооружений ОПО необходимо обеспечить данные помещения автоматизированными климатическими контроллерами или системами, которые в отсутствие обслуживающего персонала непосредственно в помещении сооружения автономно с использованием алгоритмов программ круглосуточно предоставляют дежурному оператору информацию о состоянии климата в конкретном защищаемом помещении, что позволяет ему принять самостоятельное решение о включении соответствующих систем, например отопительных приборов, увлажнителей и т.п.; либо автономная система, согласно заложенной программе, автоматически включит приборы. Исследования в данном направлении [33] указали на необходимость в дополнительном контроле за микроклиматом в производственном и ином помещении ОПО с выводом на контрольную панель дежурного оператора/диспетчера, а также (желательно) на индивидуальный контроль со стороны обслуживающего персонала.

Для защиты здания от избыточного давления или аварийного взрыва 5 кПа и выше еще на стадии проектирования ОПО у организаций возникает потреб-

⁷ ГОСТ Р 56288–2014. Конструкции оконные со стеклопакетами легкобрасываемые для зданий. Технические условия.

⁸ О признании утратившими силу приказов Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30.11.2020 № 734/пр, от 22.10.2021 № 774/пр : Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 04.04.2024 № 241/пр.

ность предусмотреть ЛСК. Тип ЛСК обуславливается регионом местонахождения ОПО, следовательно, если местом нахождения ОПО является Арктика, то в данном случае требуется применять ЛСК, которые имеют высокие теплопроводные свойства. Таким материалом являются сэндвич-панели, так как их конструкция позволяет выполнять функции теплозащиты здания в большей степени, нежели чем обычные ЛСК, выполненные из металлического листа или оконного блока, остекленного одним стеклом, ранее указывалось, что применять в качестве ЛСК стеклопакет не допускается.

Для упрощения далее по тексту в настоящей работе определения ЛСК из сэндвич-панелей используется термин легкобрасываемая сэндвич-панель (ЛССП), данный термин имеет такое же конструктивное решение по защите здания, как легкобрасываемая конструкция (ЛСК) или предохранительная конструкция (ПК), разница лишь в том, что ЛССП конкретно указывает на принадлежность к сэндвич-панелям. В проанализированных авторами научных работах термин легкобрасываемые конструкции из сэндвич-панелей или аббревиатура ЛССП отсутствуют, поэтому данный термин и его аббревиатура принадлежат авторам настоящей статьи. ЛССП — это легкобрасываемая сэндвич-панель, выполненная из двух рифленых (нерифленых) листовых металлических пластин, связанных между собой внутренним наполнителем, имеющих специальные РУК для крепления к конструкции здания/сооружения.

Подчеркнем, что предназначение ЛССП по защите здания от аварийных взрывов ничем не отличается от обычного ЛСК, а вот технические характеристики уже отличаются, так как ЛССП является легкобрасываемой конструкцией с высокими теплоизоляционными свойствами и универсальностью в применении. Как правило, изолирующим материалом служит газонаполненная пластмасса или минеральная вата, либо иной наполнитель. Предпочтение тому или иному изоляционному материалу следует отдавать исходя из особенностей объекта строительства и его назначения. В целом акцент выбора наполнителя для ЛССП должен основополагаться на безопасности для окружающей среды и людей, но никак не на экономические составляющие.

В работах [34, 35] детально исследовано применение сэндвич-панелей как ЛСК, а натурными испытаниями подтверждена эффективность применения сэндвич-панелей в качестве ЛСК. Единственным недостатком предложенных моделей является то, что применение сэндвич-панелей в качестве ЛСК предполагается в условиях умеренного климатического пояса России и не рассматривается вариант применения их в Арктической зоне, а предложенный вариант [36] технического перевооружения стеновых сэндвич-панелей

в ЛСК путем удаления самонарезных болтов, кроме четырех, прикрепленных к несущим металлическим конструкциям, требует дополнительного и детального исследования при экстремально низкой температуре в условиях ветровых нагрузок, которые могут сильно повлиять на работоспособность ЛСК. Поэтому такой принцип работы ЛСК должен являться индивидуальным и рассматриваться в каждом конкретном случае монтажа для каждого отдельного здания/сооружения, если строительство объекта производится в зоне снеговой и ветровой нагрузок I и выше⁹ (СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»).

Далее проведен анализ существующих патентов ЛСК, типы которых применяются в Российской Федерации и за рубежом, авторы патентов предлагают применять их модели или изобретения в качестве ЛСК для строительства промышленных зданий, в которых может образовываться избыточное давление, возникающее в результате аварийного взрыва. Выделены основные патенты на изобретения (модели), а также представлен краткий обзор и вывод предлагаемого ЛСК.

1. Известна модель ЛСК¹⁰. Изделие указано на рис. 7, а.

Принцип работы модели ЛСК: под воздействием внутреннего избыточного давления на ЛСК (до 70 кг/м²) происходит разрушение механизма I (рис. 7, б), а точнее элемента $2I$, закрепленного на шпильке 18 с последующим выдавливанием ЛСК из проема с удержанием ЛКС в подвешенном состоянии при помощи страховочных стальных оцинкованных тросов.

Рассмотренная модель ЛСК эффективна для применения в условиях умеренного климатического пояса России, где средняя температура окружающей среды в зимнее время года не становится ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. В случае эксплуатации подобной модели в условиях температуры окружающей среды $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже в местах крепления легкобрасываемого механизма I (рис. 7, а) может образоваться конденсат/наледь, а также возможно образование плотного снежного намета или наледи на выступе в зоне 8 (рис. 7, а). Эти влияния не были исследованы автором патента, что, соответственно, делает предлагаемую конструкцию малоэффективной для эксплуатации в Арктической зоне в качестве ЛСК.

2. Также известна модель ЛСК¹¹. Изделие ЛСК указано на рис. 8. Принцип работы модели ЛСК: под воз-

⁹ СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85* (утв. Приказом Минстроя России от 03.12.2016 № 891/пр) (ред. от 30.12.2020).

¹⁰ Патент RU 164516 U1. Легкобрасываемая конструкция взрывоопасных помещений на базе блока оконного из поливинилхлорида.

¹¹ Патент RU 177097 U1. Легкобрасываемая ограждающая строительная конструкция для взрывоопасных помещений.

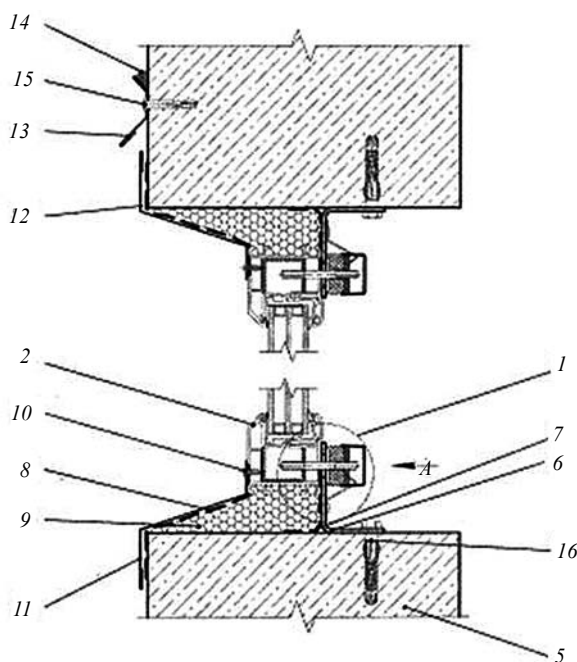


Рис. 7, а. Модель ЛСК⁹. Изображение схемы общего вида легкобрасываемой конструкции на базе блока оконного из поливинилхлорида: 1 — разрушаемый узел крепления рамы; 2 — легкобрасываемая конструкция; 5 — стеновой проем; 6 — базовый элемент (основание); 7 — лента; 8 — паропроницаемая и гидроизолирующая лента; 9 — утеплитель (минеральная вата); 10 — саморез с пресс-шайбой; 11 — нижний отлив; 12 — вентиляция для минеральной ваты утеплителя; 13 — желобчатая часть верхнего отлива; 14 — атмосферостойкий герметик; 15 — крепежные элементы; 16 — крепежные элементы (шпилек-саморезов)

Fig. 7, a. Model of LRS⁹. Image of the general appearance of an lightweight removable structure based on a PVC window block: 1 — destructible frame fastening unit; 2 — lightweight removable structure; 5 — wall opening; 6 — base element (foundation); 7 — tape; 8 — vapor-permeable and waterproofing tape; 9 — insulation (mineral wool); 10 — self-tapping screw with press washer; 11 — lower ebb; 12 — ventilation for mineral wool insulation; 13 — grooved part of the upper ebb; 14 — weather-resistant sealant; 15 — fasteners; 16 — fasteners (studs-self-tapping screws)

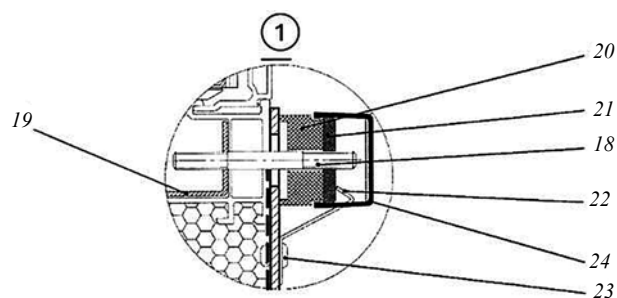


Рис. 7, б. Модель легкобрасываемой конструкции⁹, легкобрасываемый элемент, разрушаемый узел крепления рамы: 18 — шпилька; 19 — стальной армирующий профиль; 20 — дистанционная распорная втулка; 21 — разрушаемый элемент; 22 — пружинный фиксатор; 23 — заклепка; 24 — защитный колпак

Fig. 7, b. Model of LRS⁹, an easily detachable element, destructible frame fastening unit: 18 — stud bolt; 19 — steel reinforcing profile; 20 — spacer sleeve; 21 — destructible element; 22 — spring retainer; 23 — rivet; 24 — protective cap

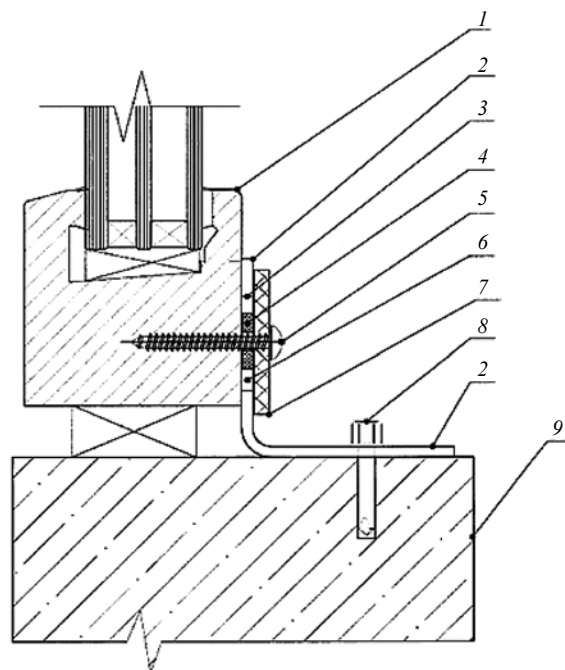


Рис. 8. Модель ЛСК¹⁰. Общий вид конструкции: 1 — смещаемый элемент; 2 — опорный кронштейн; 3 — дистанционная шайба; 4 — отверстие в кронштейне; 5 — винт; 6 — зазор; 7 — разрушаемая шайба; 8 — крепление кронштейна к каркасу (стене) здания; 9 — стена или силовой каркас здания

Fig. 8. Model LRS¹⁰. General view of the structure: 1 — displaceable element; 2 — support bracket; 3 — spacer washer; 4 — hole in the bracket; 5 — screw; 6 — gap; 7 — destructible washer; 8 — bracket fastening to the frame (wall) of the building; 9 — wall or load-bearing frame of the building

действием внутреннего давления (до 70 кг/м²) на каркас ЛСК 1 происходит вскрытие винта 5 вместе с дистанционной шайбой 3, в результате смещаемый каркас отсоединяется от опорного кронштейна 2 с последующим высвобождением проема.

Предложенная модель ЛСК, как и предыдущая, эффективна для применения в условиях умеренного климатического пояса России, где средняя температура окружающей среды в зимнее время года не понижается –20 °С и ниже. Для применения данной конструкции в качестве ЛСК на взрывоопасных помещениях в условиях температуры окружающей среды –41 °С и ниже конструкцию ЛСК необходимо исследовать в температурных режимах Арктической зоны, так как существует вероятность, что утеплитель/теплоизолятор, установленный между силовым каркасом сооружения 9 и ЛСК 1, подвергнется обледенению или на нем может образоваться конденсат. Также практическое применение данной конструкции, а именно стеклопакета, в условиях экстремально низких температур малоэффективное.

3. Следующая модель ЛСК¹². Изделие ЛСК указано на рис. 9. Принцип работы модели ЛСК: при

¹² Патент RU 193045 U1. Легкобрасываемая ограждающая конструкция для взрывоопасных помещений.

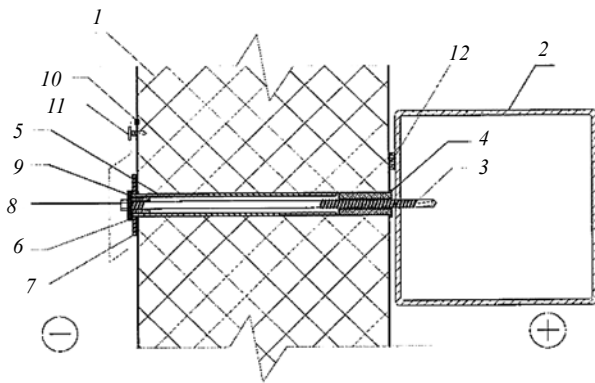


Рис. 9. Модель ЛСК¹¹. Общий вид конструкции: 1 — ЛСК-панель; 2 — каркас здания; 3 — самонарезающий винт; 4 — центрирующая втулка; 5 — дистанционная втулка; 6 — разрушаемый элемент с шайбой; 7 — усиливающая шайба; 8 — головка самонарезающего винта; 9 — центрирующий элемент; 10 — фасонный элемент; 11 — винт; 12 — уплотнитель

Fig. 9. Model LRS¹¹. General view of the structure: 1 — LRS panel; 2 — building frame; 3 — self-tapping screw; 4 — centering sleeve; 5 — spacer sleeve; 6 — destructible element with washer; 7 — reinforcing washer; 8 — head of self-tapping screw; 9 — centering element; 10 — shaped element; 11 — screw; 12 — seal

образовании давления до 5 кПа внутри помещения (авторы указывают дефлаграционный взрыв) ЛСК давление давит на ЛСК и под воздействием нагрузки на элемент 6 головка самонарезающего винта 8 продавлиывает и сминает элемент легкобрасываемого крепления 6. При этом конструкция ЛСК высвобождает проем и удерживается на страховочных тросах. Таким образом происходит сброс давления внутри помещения.

Рассмотренная модель ЛСК, как и предыдущие, имеет недостатки, если данная ЛСК будет применяться в Арктической зоне. Недостатками технического решения являются следующие:

- узел легкобрасываемого крепления не имеет защиты от внешних осадков (дождь, снег). Таким образом, дистанционная втулка 5 подвергается наполнению осадками с последующим образованием льда/наледи при минусовой температуре окружающей среды, также не исключено образование ржавчины на металле дистанционной втулки 5 и самонарезающего винта 3;
- отсутствует решение об исключении образования конденсата/наледи в местах соприкосновения дистанционной втулки 5 с каркасом здания и врезки самонарезающего винта 3 в металлический каркас, так как уплотнитель 12 установлен только с одной стороны;
- не раскрыт вопрос, каким образом высвобождается ЛСК 1 из замковых соединений верхней и нижней стеновых панелей;
- не представлено решение об исключении попадания осадков (дождь, снег) в наполнитель сте-

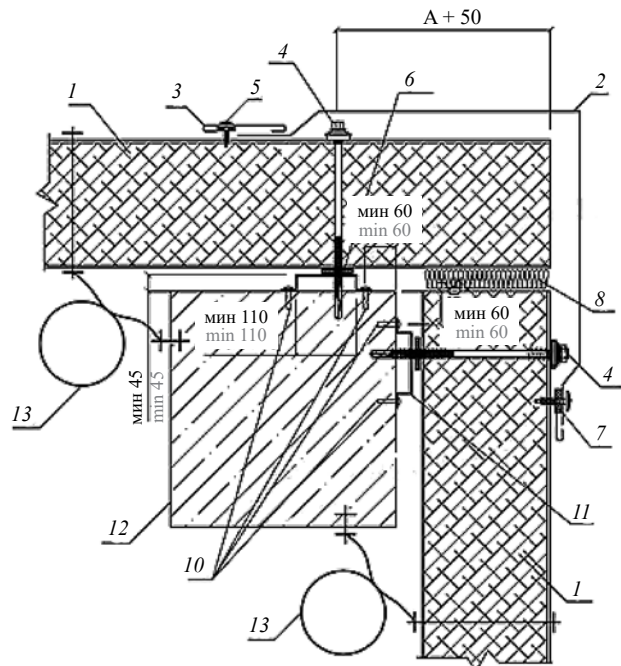


Рис. 10, а. Модель ЛСК в сборе с легкобрасываемым саморезом от компании ООО «Металл Профиль»: 1 — трехслойная сэндвич-панель МП ТСП-Z; 2 — стыковочный элемент ФИ54, $t = 0,5$ мм; 3 — стыковочный элемент ФИ53, $t = 0,5$ мм; 4 — легкобрасываемое крепление (узел 5), шаг по расчету; 5 — саморез $04,2 \times 16(19)$ с прессшайбой или $04,8 \times 28$ с ЭПДМ-прокладкой или заклепка $03,2 \times 8$ (цветная комбинированная), шаг 300 мм; 6 — уплотнитель терморазделяющая полоса; 7 — герметик силиконовый; 8 — минеральная или стекловата легких марок; 9 — металлическая стойка или колонна; 10 — дюбель, шаг 600 мм; 11 — профиль оцинкованный ФИУ5, $t = 2,0$ мм; 12 — железобетонная колонна; 13 — крепление демпфирующей петли М20 (узел 3)

Fig. 10, a. Model LRS assembled with easily removable self-tapping screws of company LLC "Metal Profile": 1 — three-layer sandwich panel MP TSP-Z; 2 — jointing element FI54, $t = 0.5$ mm; 3 — jointing element FI54, $t = 0.5$ mm; 4 — lightweight fastening (node 5), spacing as per calculation; 5 — self-tapping screw $04.2 \times 16(19)$ with a press washer or 04.8×28 with EPDM gasket or rivet 03.2×8 (coloured combined), spacing 300 mm; 6 — sealant thermally separating strip; 7 — silicone sealant; 8 — mineral or glass wool of lightweight grades; 9 — metal post or column; 10 — anchor, step 600 mm; 11 — galvanized profile FIU5, $t = 2.0$ mm; 12 — reinforced concrete column; 13 — damping loop fastener M20 (node 3)

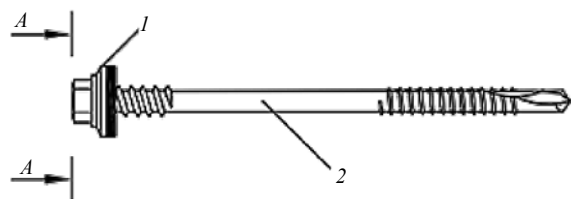


Рис. 10, б. Модель легкобрасываемого самореза ЛСК компании ООО «Металл Профиль»: 1 — ослабленная шайба; 2 — саморез со сточенной шляпкой

Fig. 10, b. Model easy-release screw of the LRS of company LLC "Metal Profile": 1 — loosened washer; 2 — self-tapping screw with cropped flat

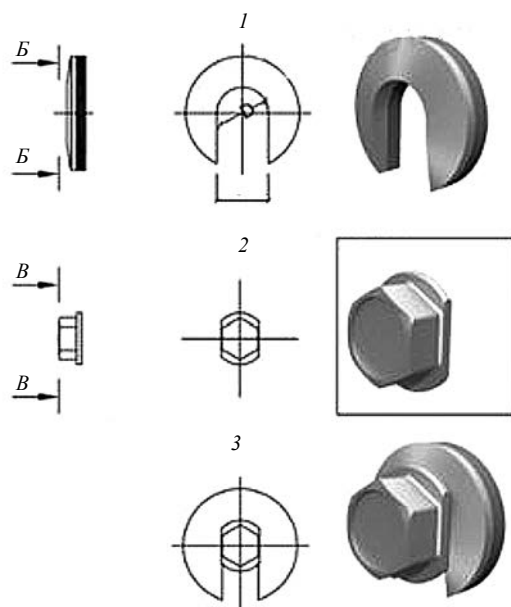


Рис. 10, с. Модель легкосъёмного болта ЛСК компании ООО «Металл Профиль»: 1 — сточенная шайба для самореза; 2 — сточенный фланец головки самореза; 3 — общий вид головки самореза со сточенным фланцем и сточенной шайбой самореза

Fig. 10, c. Model easy-release screw of the LRS of company LLC “Metal Profile”: 1 — cropped washer for self-tapping screw; 2 — cropped washer flange of self-tapping screw head; 3 — general view of self-tapping screw head with cropped washer flange and cropped washer of self-tapping screw

новой сэндвич-панели и ЛСК в боковых стыковочных местах.

4. Также известна модель ЛСК, представленная в проекте производства работ компании ООО «Компания Металл Профиль». Смонтированное изделие ЛСК вместе с элементом легкобрасываемого крепления указано на рис. 10, а, отдельно легкобрасываемое крепление, а именно болт и шайба, на рис. 10, б. Принцип работы предложенной модели ЛСК: при образовании избыточного давления 1 кПа внутри помещения, например газораспределительного пункта, давление давит на ЛСК 1 (рис. 10, а), которое закреплено легкобрасываемыми саморезами 4 (рис. 10, а), под воздействием нагрузки сточенный фланец головки самореза 2 (рис. 10, с) слетает со сточенной шайбы самореза 1 (рис. 10, с), и таким образом ЛСК освобождается от удержания и высвобождает проем, повиснув на демпфирующих петлях 1/3 (рис. 10, а).

Монтаж легкосъёмного болта следующий: прижимная шайба отделяется от ЭПДМ прокладки, откусывается или отпиливается на расстояние, равное диаметру ее отверстия ($\varnothing D = B$). После этого шайба собирается обратно с ЭПДМ-прокладкой и одевается на саморез SmartBOLT. При монтаже шайбу располагать откусанной или отпиленной стороной вниз для предотвращения затекания и скапливания воды. Для предотвращения попадания влаги и возможной коррозии рекомендуется на незащи-

щенные фасонными изделиями саморезы устанавливать декоративные колпачки в цвет фасада.

Для применения легкосъёмного крепления к определенной конструкции требуется провести соответствующий расчет. Известно, что максимальное избыточное давление, которое может выдержать здание: кирпичное — от 2 до 4 кПа, бетонное — от 8 до 10 кПа [37], а давление вскрытия ЛСК должно соответствовать следующему критерию (1):

$$P_{\text{п.в}} \leq \Delta P_{\text{вск}} \leq P_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{п.в}}$ — расчетное значение пиковой ветровой нагрузки по СП 20.13330.2016⁹ (с учетом коэффициента надежности для ветровой нагрузки), Па; $\Delta P_{\text{вск}}$ — избыточное давление вскрытия ЛСК, Па; $P_{\text{доп}}$ — допустимое давление на несущие конструкции здания, определяемое заданием на проектирование.

Таким образом, для разрушения легкосъёмного крепления избыточное давление на легкобрасываемую конструкцию 1 (рис. 10, а) должно составлять для зданий газораспределительного пункта ≤ 1 кПа, а для насосно-компрессорного отделения ≤ 2 кПа¹³.

Рассмотренная модель ЛСК также имеет недостатки, если данная модель ЛСК будет применяться в Арктической зоне. Недостатками технического решения является следующее:

- отсутствуют исследования данной модели в условиях, приближенных к экстремально низким температурам, так как при воздействии отрицательных температур сэндвич-панели толщиной более 100 мм не производились;
- не проводились исследования влияния отрицательных температур на металл сэндвич-панелей, так как металл имеет свойства сжиматься и расширяться 4 (рис. 9);
- влияние ветровых нагрузок может привести к расширению просверленного отверстия под саморез, а также к люфту и выпаданию откусанной шайбы самореза 1, 2 (рис. 10, с), в результате чего осадки могут попасть внутрь, образуя наледь, а также коррозию;
- также не совсем ясно, как будет работать элемент замкового соединения ЛСК в условиях экстремально низких температурах, так как в местах замкового соединения может образоваться наледь, что повлияет на время сброса ЛСК.

¹³ Комаров А.А., Громов Н.В. Отчет о выполнении работы по теме: Разработка методики расчетов и рекомендаций по монтажу легкобрасываемых конструкций из стеновых трехслойных сэндвич-панелей производства ООО «Компания Металл Профиль», обеспечивающих безопасные нагрузки при аварийных взрывах. 2017. URL: https://metallprofil.tj/upload/iblock/456/Otchet_o_vozmozhnosti_primeneniya_TSP_v_kachestve_LSK_MGSU_2017_.pdf

Защита здания и АСДНР

При анализе сценария внутреннего аварийного взрыва ГПВС по факту пролива/утечки ЛВЖ/ГТ на производственном объекте в Арктике выявляется факт воздействия экстремально низкой температуры окружающей среды: ниже — 36°C на замковые соединения ЛСК и РУК, что приводит к риску задержки или вообще невоскресия проема ЛСК на уровне избыточного давления 5 кПа и более, который приведет к разрушению здания, пожару, ущербу, что в итоге дает понимание о применении существующих ЛСК в регионе Арктической зоны в неблагоприятных погодных условиях как малоэффективных.

Таким образом, конкретизируя причину вероятного несрабатывания ЛСК в заданном параметре, приходим к тому, что будет образовываться конденсат в виде наледи или инея на сопряженных стыках между частями конструкции ЛСК, так называемыми замковыми соединения, и стеновыми сэндвич-панелями в местах нахождения РУК (элементами крепления с металлоконструкциями здания). Касательно параметров образования наледи или конденсата, то все зависит от особенностей окружающей среды, наледь может достигать больших размеров до 1 м толщины на поверхности, а на боковых стенах до 50 см. Дополнительно к недостатку можно отнести образование мостика холода внутри конструкции сэндвич-панели, что может привести к ее деформации и существенно снижает теплозащиту изоляционного материала. Также неблагоприятные погодные условия образуют на ЛСК большие снежные заносы, что влияет на эффективность работы ЛСК.

Решением подобной проблематики является модификация стеновых сэндвич-панелей в виде ЛСК, что, собственно говоря, в современном мире и делается, но с условием, что будут учтены особенности климатических погодных условий заполярья (Арктика), так как существующие ЛСК не до конца исследованы для таких регионов.

Для решения существующей проблематики предложен проект универсальной легкобрасываемой конструкции из сэндвич-панелей. На рис. 11, а представлен проект смонтированных ЛСК в сборке со стеновыми сэндвич-панелями здания из ЛМК, а на рис. 11, б представлен проект в комбинации ЛСК и ЛССП в сборке со стеновыми сэндвич-панелями здания. На рис. 11, с представлен проект монтажа ЛССП, полностью защищающего здание.

Для определения места установки ЛССП требуется провести анализ вероятных аварийных событий с таким подходом, чтобы имелся доступ для персонала и пожарно-спасательной бригады.

Площадь и параметры ЛССП применительно как и для обычных ЛСК, но в любом случае необходимо учитывать величину и характер аварийного взрыва

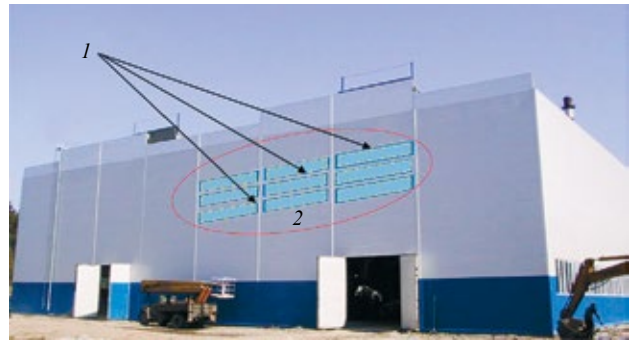


Рис. 11, а. Примерный дизайн установки легкобрасываемых конструкций на производственном здании категории А или Б: 1 — смонтированные ЛСК; 2 — стеновые сэндвич-панели

Fig. 11, a. Model easy-release screw of the LRS of company LLC “Metal Profile”: 1 — cropped washer for self-tapping screw; 2 — cropped washer flange of self-tapping screw head



Рис. 11, б. Примерный дизайн установки легкобрасываемых конструкций в комбинации с легкобрасываемыми сэндвич-панелями на производственном здании категории А или Б: 1 — смонтированные ЛСК; 2 — стеновые сэндвич-панели; 3 — легкобрасываемая сэндвич-панель (ЛССП)

Fig. 11, b. Approximate design of installation of lightweight removable structures in combine with lightweight removable panels on a production building of category A or B: 1 — installed lightweight removable panels (LRS); 2 — wall sandwich panels; 3 — lightweight removable sandwich panel (LRSP)



Рис. 11, с. Примерный дизайн установки легкобрасываемых сэндвич-панелей на производственном здании категории А или Б: 1 — смонтированные легкобрасываемые сэндвич-панели (ЛССП); 2 — стеновые сэндвич-панели

Fig. 11, c. Approximate design of installation of lightweight removable sandwich panel structures on a production building of category A or B: 1 — installed the lightweight removable sandwich panels (LRSP); 2 — wall sandwich panels

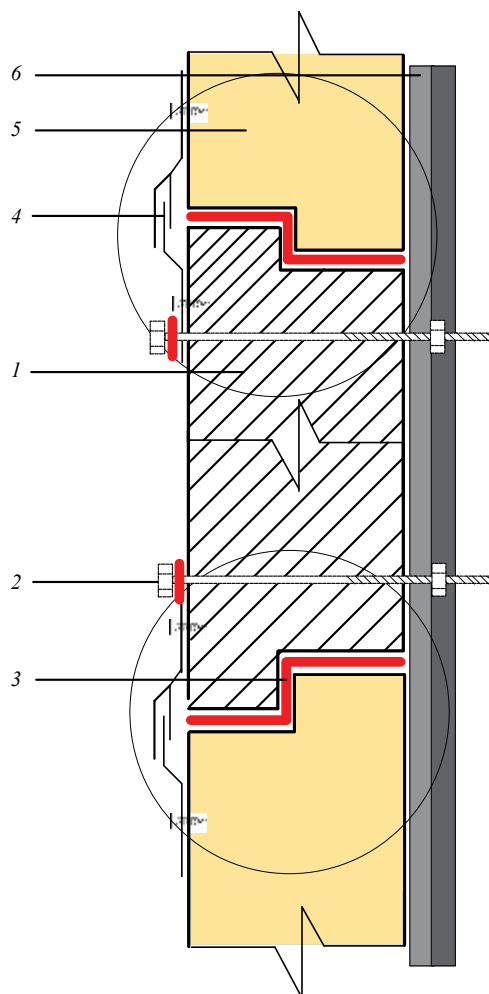


Рис. 12, а. Вид проекта ЛССП со ступенчатой системой термоизоляции: 1 — легкосбрасываемая сэндвич-панель; 2 — разрушаемый узел крепления; 3 — легкосъемное крепление; 4 — термоизоляционная подушка; 5 — защитная планка; 6 — стеновая панель

Fig. 12, a. Project view of the LRSP with staggered thermal insulation system: 1 — lightweight removable sandwich panel; 2 — destructible fastening unit; 3 — easily removable fastener; 4 — thermal insulation pad; 5 — protective strip; 6 — wall panel

или волновых явлений, которые непосредственно воздействуют на ЛССП. Исследования в области определения параметров предохранительных конструкций проводились в работах [38], где представлена модель предохранительной конструкции с расчетными математическими и экспериментальными данными. Следовательно, в дальнейших исследованиях ЛССП требуется провести подобные математические и экспериментальные расчеты величин и характера аварийных взрывов для расчета критериев и параметров ЛССП.

Модель ЛССП в горизонтальном профиле, представленная на рис. 12, а и 12, б, является проектной и рассматривать ее как конкретное решение нужно только после дальнейшего ее детального исследования и проведенных испытаний. Конструктивные

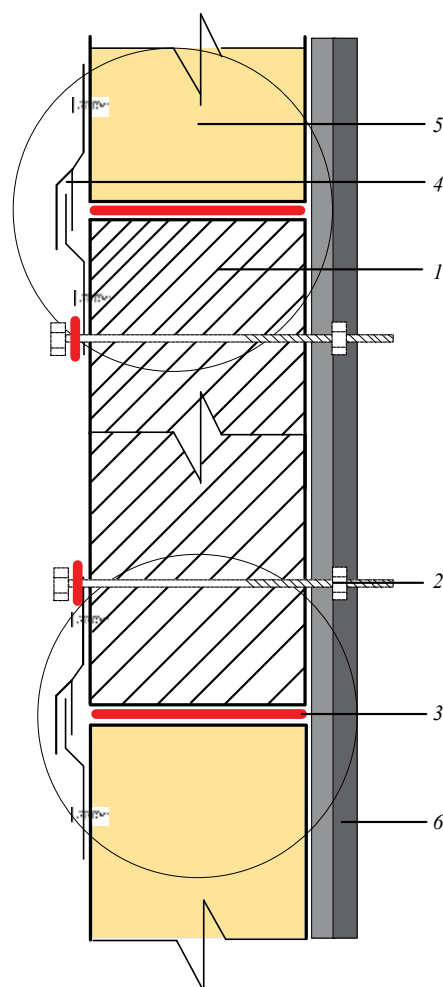


Рис. 12, б. Вид проекта ЛССП с плоской системой термоизоляции: 1 — легкосбрасываемая сэндвич-панель; 2 — разрушаемый узел крепления; 3 — легкосъемное крепление; 4 — термоизоляционная подушка; 5 — защитная планка; 6 — стеновая панель

Fig. 12, b. Project view of the LRSP with flat thermal insulation system: 1 — lightweight removable sandwich panel; 2 — destructible fastening unit; 3 — easily removable fastener; 4 — thermal insulation pad; 5 — protective strip; 6 — wall panel

отличия ЛССП на рис. 12, а от ЛССП рис. 12, б заключаются в способе термоизоляции, так в ЛССП (рис. 12, а) способ термоизоляции представлен в ступенчатом виде, а на рис. 12, б представлен прямолинейный способ термоизоляции.

В зазоре между рамой крепления стеновой сэндвич-панели 5 (рис. 12, а) и ЛССП 1 смонтирована термоизоляционная подушка 3 (рис. 12, а) ступенчатым способом, конструкция ЛССП скрепляется легкосбрасываемыми креплениями 2 (рис. 12, а) к ЛМК здания 6 (рис. 12, а); для защиты от проникновения осадков и пыли на внешней стороне в стыковочных местах монтируется защитная планка 4 (рис. 12, а). При монтаже ЛССП производится одновременно монтаж удерживающих тросов (на рис. 12, а удерживающие тросы не показаны).

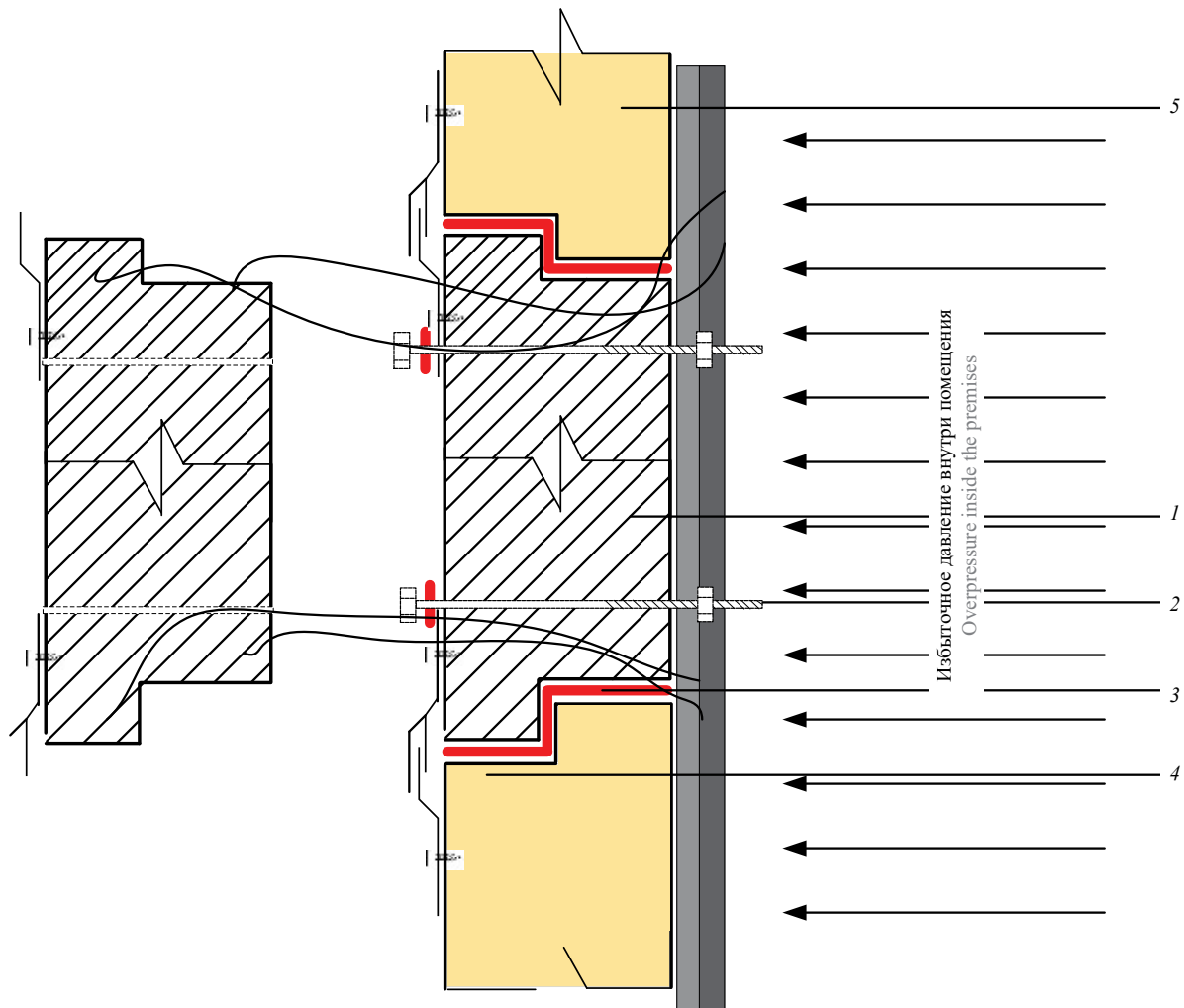


Рис. 13. Проект эффективной работы сброса ЛССП и удержание тросами в фазе гашения избыточного внутреннего давления: 1 — легкобрасываемая сэндвич-панель; 2 — разрушаемый узел крепления; 3 — термоизоляционная подушка; 4 — удерживающий трос; 5 — стеновая сэндвич-панель

Fig. 13. Design of effective operation of LRSP resetting and retention ropes the phase of excess internal pressure reduction: 1 — lightweight removable sandwich panel; 2 — destructible fastening unit; 3 — thermal insulation pad; 4 — retaining rope; 5 — wall sandwich panel

В зазоре между рамой крепления стеновой сэндвич-панели 5 (рис. 12, б) и ЛССП 1 смонтирована термоизоляционная подушка, уложенная в ровной плоскости 3 (рис. 12, б), конструкция ЛССП скрепляется разрушаемыми узлами крепления 2 (рис. 12, б) к ЛМК здания 6 (рис. 12, б); для защиты от проникновения осадков и пыли на внешней стороне в стыковочных местах монтируется защитная планка 4 (рис. 12, б). При монтаже ЛССП производится одновременно монтаж удерживающих тросов (на рис. 12, б удерживающие тросы не показаны).

На рис. 13 предлагается схема для визуального восприятия вскрытия ЛССП из проема стеновой сэндвич-панели, где показано стрелками давление на ЛССП внутреннего взрыва, равное 1 кПа, при этом ЛССП полностью сбрасывается и освобождает проем для гашения избыточного давления в здании, таким образом предотвращая разрушения и повреж-

дения элементов здания и оборудования, находящегося внутри. ЛССП при сбросе не улетает на удаленное расстояние, а удерживается на весу при помощи удерживающих тросов.

Проведены исследования ветровых нагрузок в работе [39], на оконных блоках легкобрасываемых конструкций результаты подтверждают эффективность проведенного исследования, таким образом доказывая необходимость подобного исследования ветровых нагрузок на ЛССП в условиях климата Арктики.

Удерживающие тросы имеют несколько назначений: первое — удержать ЛССП от вылета на удаленное расстояние от здания в случае образования резкого избыточного давления; второе — удерживающие тросы предотвращают вылет ЛССП на большое расстояние от здания, таким образом исключают риск травмирования людей или повреждения/загроможде-

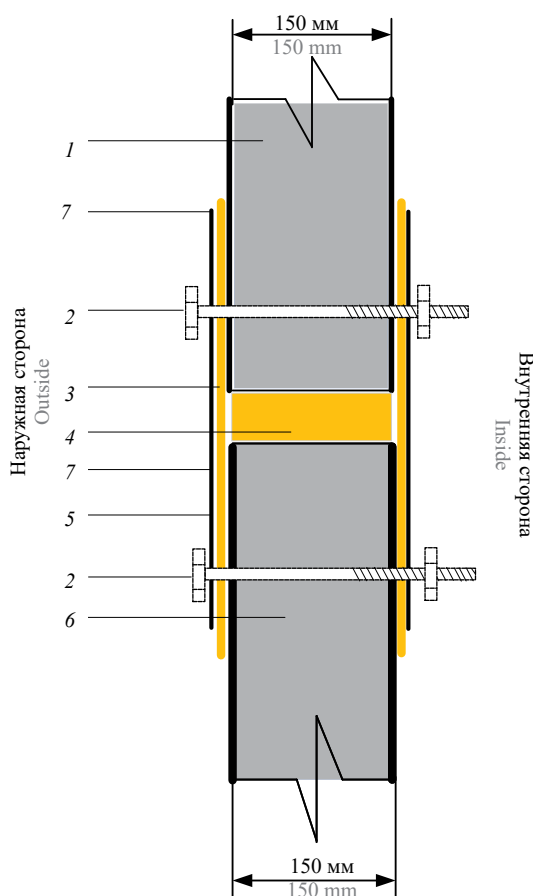


Рис. 14, а. Методы соединения ЛССП со стеновой сэндвич-панелью толщиной 150 мм: 1 — легкосбрасываемая сэндвич-панель; 2 — разрушаемый узел крепления; 3 — влаготермоизоляционная лента; 4 — термоизоляционная подушка; 5 — защитная планка; 6 — стеновая панель; 7 — защитная планка разрушаемого узла крепления

Fig. 14, a. Methods of connecting LRSP with 150 mm thick wall sandwich panel: 1 — lightweight removable sandwich panel; 2 — destructible fastening unit; 3 — moisture-insulating tape; 4 — thermal insulation pad; 5 — protective strip; 6 — wall panel; 7 — protective strip of destructible fastening unit

ния пожарно-технического оборудования, находящихся на пути вылета ЛССП; третье — использование удерживающих и страховочных тросов для обеспечения безопасности от падения с высоты при нахождении человека на эвакуационной точке (площадке).

На этапе монтажа удерживающих тросов требуется обратить внимание на их горючие свойства, при выборе удерживающих и страховочных тросов предпочтения должны отдаваться тросам из негорючих материалов, либо металла.

Дополнительно рассмотрен вариант ЛССП для стеновых сэндвич-панелей разной толщины, на рис. 14, а предлагается схематическое изображение состыковки ЛССП 150 мм со стеновой сэндвич-панелью 150 мм, а на рис. 14, б представлен проект состыковки ЛССП со стеновой сэндвич-панелью 300 мм и более. При монтаже необходимо учесть защиту стыковочных соединений защитной

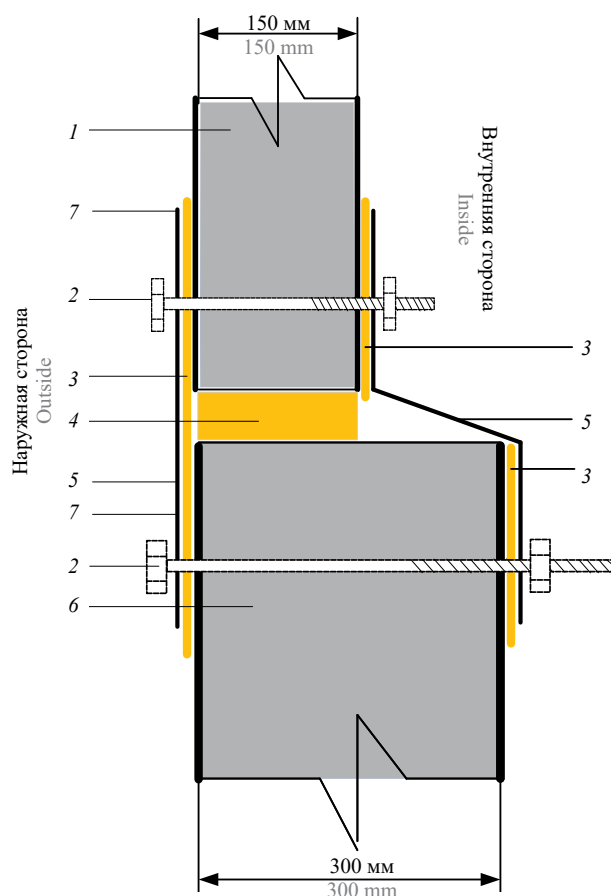


Рис. 14, б. Методы соединения ЛССП со стеновой сэндвич-панелью толщиной 300 мм и больше: 1 — легкосбрасываемая сэндвич-панель; 2 — разрушаемый узел крепления; 3 — влаготермоизоляционная лента; 4 — термоизоляционная подушка; 5 — защитная планка; 6 — стеновая панель; 7 — защитная планка разрушаемого узла крепления

Fig. 14, b. Methods of connecting LRSP with 300 mm and thicker wall sandwich panel: 1 — lightweight removable sandwich panel; 2 — destructible fastening unit; 3 — moisture-insulating tape; 4 — thermal insulation pad; 5 — protective strip; 6 — wall panel; 7 — protective strip of destructible fastening unit

планкой 5 (рис. 14, а, 14, б) от образования наледи и проникновения осадков в стыковочные соединения и РУК, термозащита должна иметь характеристики применения в условиях Арктической зоны типа влаготермоизоляционной ленты 3 (рис. 14, а, 14, б), для термоизоляции предусмотрена термоизоляционная подушка 4 (рис. 14, а, 14, б) по всей конструкции ЛССП, также должна быть предусмотрена защита для разрушаемых узлов крепления 7 (рис. 14, а, 14, б), разрушаемые узлы крепления крепятся к легким металлическим конструкциям здания 2 (рис. 14, а, 14, б). Важно отметить, что термоизоляционная подушка играет главную роль в обеспечении работоспособности ЛССП, так как в ее характеристики должны быть включены такие свойства, как исключение образования мостика холода, изоляция стыковочных мест от проникновения воды при ветровом нагоне осадков, способность

выдерживать ветровые нагрузки, а также основная ее функция — термоизоляция с такими же свойствами, как стеновая сэндвич-панель.

Для решения задач, связанных с проведением аварийно-спасательных и других неотложных работ (АСДНР), прибывшей на место аварии пожарно-спасательной части (ПСЧ) и в случае отсутствия доступа в здание с целью тушения пожара и спасения людей предложен вариант вскрытия ЛССП для открытия аварийного проема. Суть данного варианта заключается в следующем: при пожаре внутри производственного помещения и отсутствии доступа вовнутрь помещения пожарно-спасательной команды для отсечения пожара и спасения людей допускается вскрытие ЛССП с помощью наружных тросов, для этого необходимо потянуть за наружный трос для ручного сброса ЛССП 5 (рис. 15), при этом разрушаемый узел крепления 3 (рис. 15) деформируется и ЛССП освобождает проем. С учетом высоты нахождения ЛССП возможно потребуется применить автомобильный гидравлический подъемник.

На этапе монтажа удерживающих тросов требуется обратить внимание на их горючие свойства, при выборе троса предпочтения должны отдаваться тросам из негорючих материалов, либо металла.

На рис. 16 представлен проект работы ЛССП в качестве аварийной эвакуационной точки для персонала в случае чрезвычайной ситуации. Данная полезная модель устанавливается на любой высоте, в зависимости от необходимости. Монтаж полезной модели эвакуационной точки должен быть основан на проведенных оценках риска еще на этапе проектирования опасного производственного объекта или во время эксплуатации, при этом учитываются все опасности и риски.

Применение полезной модели (аварийной эвакуационной точки) оправдано только в том случае, если угроза жизни персоналу очевидна, а именно:

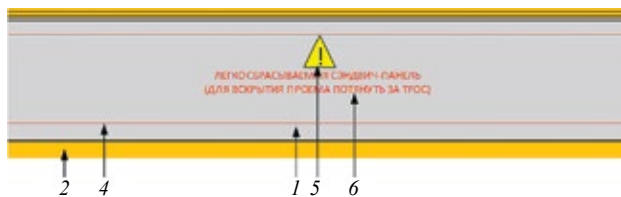


Рис. 15. Проект общего вида ЛССП в сборе в стеновой сэндвич-панели: 1 — легкосбрасываемая сэндвич-панель; 2 — стеновая сэндвич-панель; 3 — разрушаемый узел крепления; 4 — наружный трос ручного сброса ЛССП; 5 — знак W09 «Внимание. Опасность (прочие опасности)»; 6 — надпись «Легкосбрасываемая сэндвич-панель (для вскрытия проема потянуть за трос)»
Fig. 15. Design of general view of LRSP fixed in a wall sandwich panel: 1 — lightweight removable sandwich panel; 2 — wall sandwich panel; 3 — destructible fastening unit; 4 — external rope of LRSP manual reset; 5 — sign W09 “Warning. Danger (other hazards)”; 6 — inscription “Lightweight removable sandwich panel (pull the rope to open the opening)”

ситуация складывается таким образом, что у эвакуирующего персонала нет возможности воспользоваться стандартными эвакуационными выходами из-за наличия опасности угрозы жизни на пути к ним; для этого можно задействовать конструкцию ЛССП, при этом требуется непосредственное участие эвакуирующего персонала, а именно: необходимо найти в доступности ЛССП, подойти к нему, надавить на места, обозначенные на внутренней части ЛССП, и выдавить ЛССП 3 наружу, дожидаясь, когда ЛССП встанет в горизонтальное положение в виде площадки 3 с помощью удерживающих тросов 4–6, затем проникнуть на площадку и ждать помощи ПСЧ. Площадка становится таким образом, что находится ниже уровня проема, а удерживающие тросы 5 фиксируют площадку 3 от раскачивания ее в стороны. На внутренней стороне ЛССП должна размещаться необходимая информация о порядке активации ЛССП и допустимом весе. Данные ЛССП требуется оснастить наружным аварийным освещением.

Чтобы определить количество допустимого персонала на эвакуационную точку, требуется индивидуальный подход к каждой модели с учетом климатических особенностей, при этом учитывая ветровые нагрузки. Также требуется дополнительно проработать расчет системы защиты от падения с высоты, а для персонала разработать инструкцию по применению. Для практических тренировок с персоналом необходимо использовать подобие данной модели.

На рис. 17, а и 17, б представлена более подробная проектная многофункциональная полезная модель, предназначенная для сброса избыточного давления, вскрытия проема для аварийно-спасательных и других неотложных работ (АСДНР), образования эвакуационной точки (площадки) для эвакуации персонала.

Так, на рис. 17, а показан вид ЛССП как один элемент от общей конструкции ЛССП, вся конструкция ЛССП состоит из двух элементов (рис. 17, а и 17, б), которые соединяются между собой. Для обозначения ЛССП требуется установить информационную табличку «Легкосбрасываемая сэндвич-панель. Для освобождения проема вскрыть панель и выдавить наружу» 1 (рис. 17, а), а под знаками Е17 (ГОСТ 12.4.026–2015¹⁴) 5 (рис. 17, а) устанавливается табличка с текстом «Ударить здесь». В случае, если конструкцию ЛССП заклинило при ее вскрытии, то допускается продолжить вскрытие ударом ноги в место нахождения знака Е17 5, силы удара достаточно для того, чтобы панель вскрылась, так как сила удара ногой взрослого человека может достигать до 9015 N (эквивалентно 9 кПа), а при заднем ударе ногой — до 8569 N (эквивалентно 8,5 кПа) [40].

¹⁴ ГОСТ 12.4.026–2015. Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения.

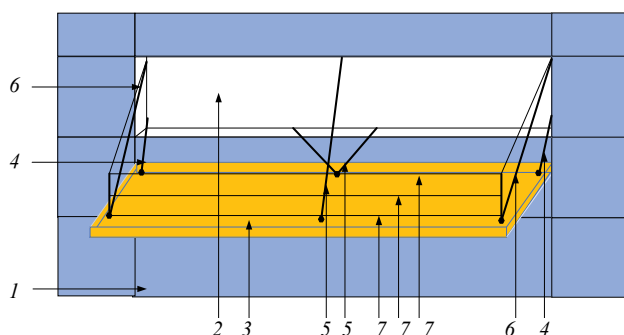


Рис. 16. Вид ЛССП во вскрытом положении: 1 — стеновая сэндвич-панель; 2 — проем; 3 — легкобрасываемая сэндвич-панель; 4 — удерживающие тросы (нижние); 5 — удерживающие тросы (середины); 6 — удерживающие тросы (верхние); 7 — удерживающие страховочные тросы

Fig. 16. View of the LRSP in the opened position: 1 — wall sandwich panel; 2 — opening; 3 — lightweight removable sandwich panel; 4 — retaining rope (bottom); 5 — retaining rope (middle); 6 — retaining rope (top); 7 — retaining safety ropes

При вскрытии панели следует соблюдать технику безопасности, так как высота расположения ЛССП может быть выше 1,8 м, что является опасной высотой, и в случае ее падения возникает риск несчастного случая [41]. Для работы на высоте требуется использовать страховочную привязь, но в случае ЧС маловероятно, что на пострадавшем будет страховочная привязь, поэтому конструкция ЛССП имеет удерживающие тросы и страховочное ограждение 9 (рис. 10, а).

Метод монтажа ЛССП следующий: на ЛМК устанавливаются обычные стеновые сэндвич-панели снизу вверх, на расчетной высоте поверх стеновой сэндвич-панели монтируется уже готовая конструкция ЛССП (рис. 15). Метод сбора двух конструкций рис. 17, а, 17, б следующий: ЛССП 1 (рис. 17, а) устанавливается в проем 10 (рис. 17, б) таким образом, чтобы термоизоляционная подушка 2 (рис. 17, а) находилась в стыковочных местах по краям ЛССП и плотно прилегала без образования щелей, далее в подготовленные проушины 3 (рис. 17, а) вкручивается разрушаемый узел крепления, который изготовлен с таким учетом, что в случае определенного давления на него происходит разрыв шляпки болта. По завершении установки ЛССП 1 (рис. 17, а) подсоединяются удерживающие и страховочные тросы 14 (рис. 17, б) к крепежным элементам 8 (рис. 17, а), после устанавливаются надписи, таблички 5, 6, 7 (рис. 17, а) и 5, 6 (рис. 15).

Пример расчета ЛССП для защиты здания

Для наглядной демонстрации защиты здания с применением многофункциональной модели ЛССП в комбинации с ЛСК представлен рис. 18. Вводные данные для определения количества ЛССП (то же самое, что и для ЛСК): производственное здание, в котором обращаются взрывопожароопасные вещества с температурой вспышки менее + 28 °С (метан — CH_4

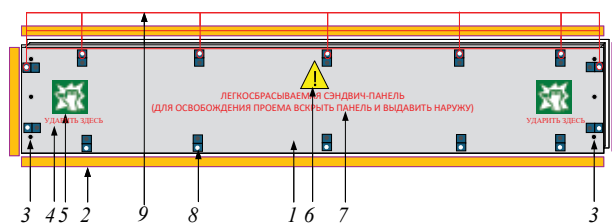


Рис. 17, а. Проект легкобрасываемой сэндвич-панели (ЛССП): 1 — легкобрасываемая сэндвич-панель; 2 — термоизоляционная подушка/лента; 3 — разрушаемый узел крепления; 4 — надпись «Ударить здесь» для таблички E175; 5 — знак E17 «Для доступа вскрыть здесь»; 6 — знак W09 «Внимание. Опасность (прочие опасности)»; 7 — надпись «Легкобрасываемая сэндвич-панель (для освобождения проема вскрыть панель и выдавить наружу)»; 8 — крепежный элемент для тросов; 9 — страховочные тросы/ограждение

Fig. 17, a. Design of lightweight removable sandwich panel (LRSP): 1 — Lightweight removable sandwich panel; 2 — thermal insulation pad/tape; 3 — destructible fastening unit; 4 — sign “Strike here” for sign E175; 5 — sign E17 “For access, open here”; 6 — sign W09 “Warning. Danger (other hazards)”; 7 — inscription “Lightweight removable sandwich panel (to release the opening, open the panel and press outwards)”; 8 — fixing element for ropes; 9 — safety ropes/fencing

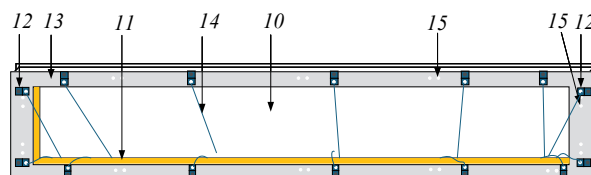


Рис. 17, б. Проект для монтажа легкобрасываемой сэндвич-панели (ЛССП): 10 — проем/рама для монтажа ЛССП; 11 — термоизоляционная подушка/лента; 12 — крепежный элемент для тросов; 13 — установочная коробка для ЛССП (стеновая сэндвич-панель); 14 — удерживающие тросы/тросы; 15 — крепление, соединяющее проем/раму с ЛССП

Fig. 17, b. Design for installation of lightweight removable sandwich panel (LRSP): 10 — opening (manhole) for LRSP installation; 11 — thermal insulation pad/tape; 12 — fixing element for ropes; 13 — installation box for LRSP (wall sandwich panel); 14 — retaining cables/ropes; 15 — fixing with connecting LRSP

и в небольшом количестве пропан — C_3H_8); габариты производственного здания, категория производства А: длина 30 м, ширина 18 м, высота 10 м, общий объем здания 5400 м³, общая площадь стен 960 м². Соответственно, данное здание относится к опасному производству, что указано в требованиях^{2, 15}.

Для информации: свойства метана следующие: метан — CH_4 , температура вспышки = 85,1 К, (–187,9 °С) (данные из [42]), молярная масса равна 16 г/моль, что легче воздуха (молярная масса воздуха = 29 г/моль). На рис. 18 показана линия стехиометрии метана.

По имеющимся вводным производственного здания произведен расчет количества ЛССП и ЛСК, где наружные стеновые сэндвич-панели зданий

¹⁵ СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям.

должны иметь легкобрасываемые конструкции не менее 0,05 м² на 1 м³ объема здания; таким образом находим по формуле (2):

S_{защ.зд} = V_{общ.зд} · 0,05 = 5400 · 0,05 = 270 м², (2)

где V_{общ.зд} — объем здания 5400 м³.

Согласно требованиям² один рулон ковровой защиты здания не может быть более 180 м², поэтому площадь ЛСК/ЛССП защиты здания 270 м² должна быть разделена на несколько рулонов по фасаду здания — a, b, c, d, где фасад a — правый, b — главный, c — левый, d — задний. Для защиты здания будет применена комбинированная система защиты, состоящая из ЛСК и ЛССП, где защита ЛСК — 210 м², а защита ЛССП — 60 м².

Для защиты здания будет применена комбинированная система защиты, состоящая из ЛСК и ЛССП, где защита ЛСК — 210 м², а защита ЛССП — 60 м².

При разделе ЛСК и ЛССП на несколько ковровых рулонов защиты здания следует провести анализ рисков вероятных аварий в производственном здании и сосредоточить наибольшее количество ЛССП и ЛСК таким образом, чтобы волна избыточного давления в случае аварии в первую очередь дошла до ЛСК и ЛССП. Также следует учесть, что метан легче воздуха, а пропан — тяжелее, и с этим учетом расположить ЛСК и ЛССП на соответствующей высоте от уровня пола.

Необходимо учесть, что внутри здания (фасад a) находится установка, работающая на метане, также место хранения одного баллона с пропаном (50 л), следовательно, основную площадь защиты здания (ЛСК и ЛССП) нужно разместить в верхней части здания, но также предусмотреть и защиту в нижней части.

Проведем расчет радиуса избыточного давления на его пике в результате образования дефлаграционного взрыва от пролива метана в объеме 50 л.

Согласно табл. 2 [43], определена масса окислителя для образования стехиометрической газовой смеси.

Определяем параметры огненного шара D (диаметр) по формуле (3) [43]:

D_s = 6,48 · m^{0,325} = 20,67 м, (3)

где m — масса мгновенно испарившегося продукта, поступившего в окружающее пространство = 35,5 кг. Максимальное давление будет наблюдаться на границе видимости огненного шара или сферы.

Определяем максимальную величину избыточного давления на границе огненного шара по формуле (4) [43]:

Δp_{max} = 24,22 · (W_{max} / 140)^{1,822} ≈ 4,6 кПа, (4)

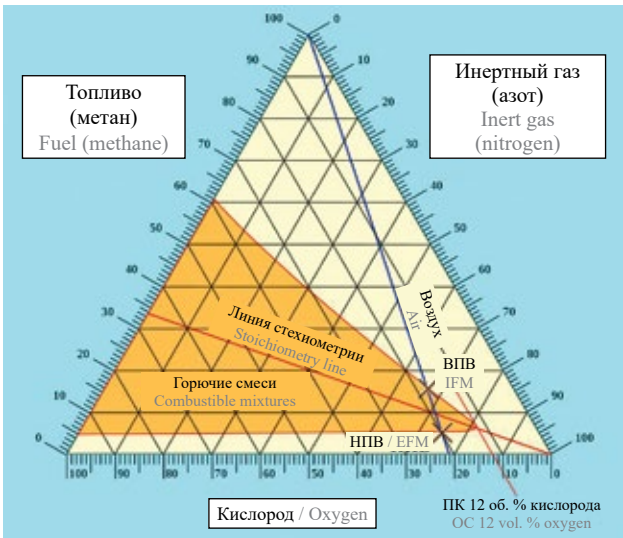


Рис. 18. Стехиометрия метана. Треугольник взрываемости ПГВС метан – кислород – азот
Fig. 18. Methane stoichiometry. Explosivity triangle of methane – oxygen – nitrogen VGAM

где W_{max} = 57, определен по формуле (W_{max} = W_{max} = K₁ · K₂ · W_{НВ}, где K₁ = 1; K₂ = 1; W_{НВ} = 57 м). Максимальное избыточное давление на границе фронта огненного шара P_{max} ≈ 4,6 кПа. Приближаясь к границе огненного шара, скорость фронта огненного шара снижается, дальше избыточное давление передается волной сжатия.

Математический расчет показал, что расположение ЛСК и ЛССП должно быть смонтировано в радиусе ≈ 20 м от места инициации взрыва. Из общей площади ЛСК находим площадь защиты ЛССП, если известно, что площадь одной панели ЛССП = 5 м², а площадь ЛСК — 9 м³, находим количество панелей ЛССП и ЛСК для защиты фасада a, d здания по формуле (5):

S_{a,b} = S_a + S_b = 168 м², (5)

где S_a — площадь ЛССП — 60 м²;
S_b — площадь ЛСК — 108 м².

На рис. 19 представлена визуализированная схема комбинированной защиты с применением ЛСК и ЛССП. Определено, что, если фасад площадью a и b — 480 м², а площадь защиты — 168 м², то общая площадь защиты — 270 м², с учетом радиуса действия избыточного давления 20 м монтаж

Таблица 2. Критерии стехиометрического соотношения для CH₄
Table 2. Stoichiometric ratio criteria for CH₄

Окислитель Oxidiser	Масса, кг (объем, м ³) Mass, kg (volume, m ³)
Кислород (O ₂) Oxygen (O ₂)	4 (2)
Воздух Air	17,24 (9,512)

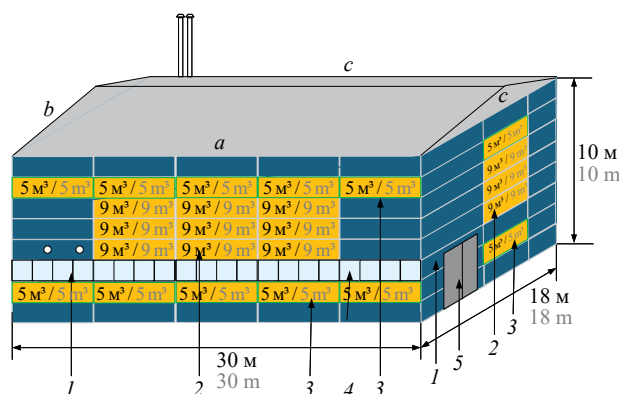


Рис. 19. Примерный план монтажа ЛСК и ЛССП в стеновых панелях промышленного здания: 1 — стеновая сэндвич-панель; 2 — легкосбрасываемая конструкция (ЛСК); 3 — легкосбрасываемая сэндвич-панель (ЛССП); 4 — оконный стеклопакет с усиленными изоляционными характеристиками; 5 — технические ворота

Fig. 19. Approximate plan of installation of LRS and LRSP in the wall panels of an industrial building: 1 — wall sandwich panel; 2 — lightweight removable structure (LRS); 3 — lightweight removable sandwich panel (LRSP); 4 — window glazing with reinforced insulation characteristics; 5 — technical gate

ЛСК и ЛССП следует сконцентрировать на фасадах здания — *a*, *b*, что составит 62 % от общей защиты здания 270 м².

Для защиты зданий небольших размеров ЛССП и ЛСК должны монтироваться в верхней части здания, так как при утечке или проливе метана ГПВС поднимается вверх, где образуется избыточное давление. Для определения силы избыточного давления при аварийном взрыве внутри производственного помещения требуется провести дополнительные исследования и натурные испытания и найти плотность образования облака ГПВС, величину избыточ-

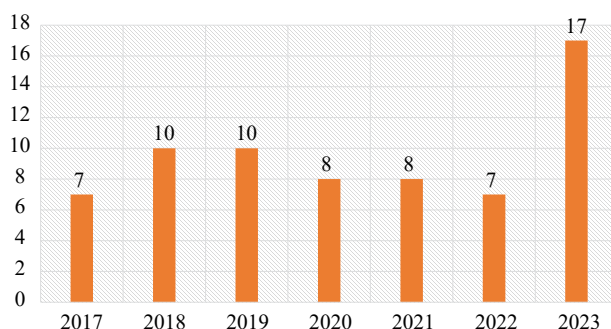


Рис. 20. Статистика взрывов на производственных предприятиях с 2017 по 2023 г

Fig. 20. Statistics of explosions at manufacturing plants from 2017 to 2023

ного давления, время образование огненного шара, параметры огненного шара, а также время и силу образования импульсов волн сжатия и разрежения.

В работе [44] авторы определили скорость дефлаграционного взрыва, образовавшегося на открытом пространстве без каких-либо влияний внешней среды, также авторы предоставляют сведения о высоте облака ГПВС. Следовательно, работы авторов применимы, но требуются дополнительные исследования с учетом влияния факторов окружающей среды климата Арктики.

Заключение

Статистика взрывов за последние годы (рис. 20) в период с 2017 по 2023 г. показывает рост их числа на опасных производственных объектах в России, с заметной стабилизацией в 2018–2021 гг. и резким скачком в 2023 г. (данные для статистики рис. 20 взяты из открытых источников интернет-ресурса). Это может свидетельствовать о нарастании проблем с безопасностью на производственных объектах, а также других факторах, которые способствовали увеличению числа происшествий в 2023 г.

Последствия взрывов показали, что в систему защиты здания и людей требуется внесение технологических и административных изменений, поэтому дальнейшее исследование с защитными функциями зданий будут продолжено. Вышеизложенное показывает, что проектная модель ЛССП является актуальной на сегодняшний день, требует дальнейшего исследования с проведением испытаний, так как важным исследованием по-прежнему остается защита производственных зданий от влияния избыточного давления и волновых явлений взрыва.

Подведем итог. Эффективность существующих ЛСК, применяемых для защиты зданий/сооружений, непосредственно зависит от факторов окружающей среды, соответственно, если требуется применение ЛСК в климатических погодных условиях, где температура окружающей среды больше 6 месяцев составляет ниже –35 °С, то, соответственно, ЛСК должны быть адаптированы для данных условий. Тем не менее функциональность существующих и применяемых на сегодняшний день ЛСК не оспаривается, и они эффективны в тех параметрах окружающей среды, в которых были исследованы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Vijayan D.S., Sivasuriyan A., Patchamuthu P., Jayaseelan R. Thermal performance of energy-efficient buildings for sustainable development // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. No. 29. Pp. 51130–51142. DOI: 10.1007/s11356-021-17602-3
2. Panel Plant in Detroit Koppers Plan // *Pittsburgh Post-Gazette*. May 6, 1959.

3. Бэла Ляув. Кирпич против панели // Коммерсантъ Дом. 2004. № 58. С. 26. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/460272?ysclid=m2t5cjoxda630358174>
4. Global Sandwich Panels Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report by Product type. By Application, By End user: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2031 // Engineering, Equipment And Machinery/Jul 2022/Report Code: A17020/Pages: 221/Tables: 93/Charts: 61. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5846781/global-sandwich-panels-market-size-share-and>
5. Алисов Б.П. Географические типы климатов // Метеорология и гидрология. 1936. № 6.
6. Диппель И.В., Шабанов Е.А. Технологические особенности быстровозводимых зданий из металлических конструкций // XIV Всеросс. науч.-практ. конф. молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ». 19–22 апреля 2022 г.
7. Кузнецов Д.Н., Емельянов Д.И., Павленко Т.М. Силовая сэндвич-панель поэлементной сборки // Строительная механика и конструкции. 2020. № 1 (24). С. 70–84. EDN DEMPXQ.
8. Pedro Andrade, Ove Lagerqvist, Rui Simões, Gabriel Sas. On global and local buckling response of structural angle sandwich panels // Thin-Walled Structures. 2022. Vol. 180 (11). P. 109835. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109835
9. Liana Ostetto, Romain Sousa, Paulo Fernandes, Hugo Rodrigues. Influence and effectiveness of horizontal diaphragms and cladding wall panels on the seismic behaviour of precast RC industrial buildings // Engineering Structures. 2023. Vol. 285. P. 116046. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116046
10. Tilak Prasad Sah, Andrew William Lacey, Hong Hao. Prefabricated concrete sandwich and other lightweight wall panels for sustainable building construction : State-of-the-art review // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 89. P. 109391. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109391
11. Behzad Fotovvati, Navid Namdari, Amir Dehghanghadikolaei. On coating techniques for surface protection : a review // J. Manuf. Mater. Process. 2019. No. 3 (1). P. 28. DOI: 10.3390/jmmp3010028
12. Erofeev V.I., Monich D.V. Sound insulation properties of sandwich panels // 2020 IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng. 896 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012005
13. Рожнятовский Г.И., Ванчугов И.М., Прокофьев В.А., Нуржиц С.И., Ишмурзин А.А. Газоперерабатывающая отрасль России, анализ и перспективы ее развития // НефтеГазоХимия. Экономика и бизнес. 2020. № 2. С. 47–54. DOI: 10.24411/2310-8266-2020-10210. EDN GTGVLR.
14. Сафонова Т.Ю. Перспективы российской нефтегазодобычи в Арктике: от обвала до развития // Креативная экономика. 2020. Т. 14. № 10. С. 2569–2590. DOI: 10.18334/ce.14.10.111085
15. Орлов Г.Г., Корольченко Д.А., Корольченко А.Я. Экономическая оценка эффективности применения предохранительных конструкций для обеспечения взрывоустойчивости зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 6. С. 51–57. EDN UMHSZH.
16. Сарвут Т.О. Принципы формирования среды обитания в Арктическом регионе // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 2 (113). С. 130–140. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.130-140. EDN YQSPRC.
17. Голушков О.В., Комаров С.Л., Янович Д.Д. Сэндвич-панели как альтернатива классическим строительным материалам и оценка их конкурентоспособности // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. № 3 (48). С. 127–134.
18. Кодзоев М.-Б.Х., Исаченко С.Л. Сэндвич-панель. Материалы и конструкции // Бюллетень науки и практики/ Bulletin of Science and Practice. 2018. Т. 4. № 2. DOI: 10.5281/zenodo.1173216. EDN YOQMRM.
19. Кобзев Д.О. Сэндвич-панели с утеплителем в виде пенополиизоцианурата // Достижения науки и образования. 2018. URL: <https://interactive-plus.ru/e-articles/444/Action444-466979.pdf>
20. Коканин С.В., Цыбакин С.В. Исследование теплофизических свойств полистиролсодержащих пенопластов при их старении // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. Караваево : Костромская ГСХА, 2013. Вып. 78. С. 57–64.
21. Mohammed Elamin, Bing Li, Tan K.T. Impact damage of composite sandwich structures in arctic condition // Composite Structures. 2018. No. 192 (5). DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.03.015
22. Бобров Ю.Л., Овчаренко Е.Г., Шойхет Б.М., Петухова Е.Ю. Теплоизоляционные материалы и конструкции : учеб. для средних профессионально-технических учебных заведений. М. : ИНФРА-М, 2003. 268 с.
23. Мельников В.С., Кириллов С.В., Мельников М.В., Ванин С.А., Васильев В.Г., Потемкин С.А. Минеральная вата — теплоизоляция фасадных и кровельных систем в условиях пожара пролива и тления // Интернет-журнал «Наукоедение». 2016. Т. 8. № 6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/63TVN616.pdf>
24. El Mehdi Ablaoui, Michal Malendowski, Wojciech Szymkuc, Zbigniew Pozorski. Determination of thermal properties of mineral wool required for the safety analysis of sandwich panels subjected to fire loads // Materials. 2023. No. 16 (17). P. 5852. DOI: 10.3390/ma16175852
25. Камчаткина В.М., Бузин Г.В. Сравнение наиболее используемых утеплителей по теплофизическим и экономическим характеристикам // Матер. VII (XIII) Всеросс. науч.-технич. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых : Молодая мысль: наука, технологии, инновации. 2015. EDN WWZUNH.
26. Постовой А.А. Анализ качества сэндвич-панелей для обеспечения пожарной безопасности зданий // Молодой исследователь Дона. 2021. № 6 (33). С. 77–82.

27. Гуров А.А., Толмачева В.М. Экструдированный пенополистирол и минеральная вата как теплоизоляционный материал // Сб. науч. ст. Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. Курск, 2023. С. 200–203. EDN GODMPE.
28. Мельников В.С., Кириллов С.В., Мельников М.В., Васильев В.Г., Ванин С.А., Потемкин С.А. Пожарно-структурная экспертиза повреждений теплоизоляционных материалов из минеральной ваты и пенополиизоцианурата // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 3 (34). С. 129.
29. Кузьмин В.А. Исследование возможностей применения отражательной теплоизоляции в многослойных сэндвич-панелях с учетом многократного отражения // Строительные материалы. 2017. № 6. С. 35–40.
30. Подгорецкий Ю.Ю. Исследование надежности срабатывания легкосбрасываемых конструкций на основе сотовых поликарбонатных листов // The Scientific Heritage. 2020. № 50. С. 45–50.
31. Ulaeto S.B., Ravi R.P., Udoh I.I., Mathew G.M., Rajan T.P.D. Polymer-based coating for steel protection, highlighting metal–organic framework as functional actives // A Review. Corros. Mater. Degrad. 2023. No. 4. Pp. 284–316. DOI: 10.3390/cmd4020015
32. Джавет С. Особенности быстровозводимых зданий промышленного назначения // Мировая наука. 2023. № 3 (72). С. 100–104. EDN BLXLXH
33. Самарин О.Д., Горюнов И.И., Тещенкова И.И. Влияние конструктивных характеристик помещений на параметры регуляторов автоматизированных климатических систем // Вестник МГСУ. 2015. № 2. С. 101–109. EDN TIVXVR.
34. Поландов Ю.Х., Добриков С.А., Кукин Д.А. Результаты испытаний легкосбрасываемых конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 8. С. 5–14. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14. EDN SAWFEZ.
35. Горев В.А., Салымова Е.Ю. Использование сэндвич-панелей в качестве легкосбрасываемых конструкций при внутренних взрывах в промышленных зданиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. Т. 19. № 2. С. 41–44.
36. Скориков Б., Стромиллов Н., Будько О., Рождественский А., Рогальская Т. Использование сэндвич-панелей в качестве ЛСК при техническом перевооружении ОПО // Регламент. 2015. № 6 (44). С. 42–43. EDN WBFLNR.
37. Комаров А.А. Разрушение зданий при аварийных взрывах бытового газа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2004. № 5. С. 15–23. EDN PMDPUJ.
38. Орлов Г.Г., Корольченко Д.А., Корольченко А.Я. Определение величины и характера взрывных нагрузок при применении инерционных предохранительных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 4. С. 47–55. EDN TVFFSB.
39. Корольченко О.Н., Корольченко А.Д. Определение давления вскрытия легкосбрасываемых конструкций с учетом ветровых нагрузок // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 7. С. 914–921. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.914-921. EDN FFITIF.
40. Corcoran D., Climstein M., Whitting J., Del Vecchio L. Impact Force and Velocities for Kicking Strikes in Combat Sports : a Literature Review // Sports. 2024. No. 12 (74). Pp. 1–17. DOI: 10.3390/sports12030074
41. Youngcheol Kang, Sohaib Siddiqui, Sung Joon Suk, Seokho Chi, Changwan Kim. Trends of Fall Accidents in the U.S. Construction Industry // Journal of Construction Engineering and Management. 2017. Vol. 143. Issue 8. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.000133
42. Bunev V.A., Korzhavin A.A., Senachin P.K. Analysis of the influence of various factors on the characteristics of methane explosion hazard // International Journal of Corrosion. 2012. No. 3/1. DOI: 10.1155/2018/1258379. EDN YBZXUT.
43. Мишурев А.В., Хуснутдинов Д.З. Методика расчета нагрузок на здания и сооружения при воздействии внешних аварийных дефлаграционных взрывов. М. : МГСУ, 2004. 65 с.
44. Комаров А.А., Грохотов М.А. Определение скорости распространения фронта пламени при аварийных дефлаграционных взрывах // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 7. С. 7–13. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-7-7-13. EDN NWGKIV.

REFERENCES

1. Vijayan D.S., Sivasuriyan A., Patchamuthu P., Jayaseelan R. Thermal performance of energy-efficient buildings for sustainable development. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022; 29:51130-51142. DOI: 10.1007/s11356-021-17602-3
2. Panel plant in Detroit Koppers plan. *Pittsburgh Post-Gazette*. May 6, 1959.
3. Bela Liauw. Brick vs. panel. *Kommersant Home*. 2004; 58:26. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/460272?ysclid=m2 t5cjoxda630358174> (rus).
4. Global Sandwich Panels Market Size, Share, Competitive landscape and trend analysis report by product type, by application, by end user: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2031. *Engineering, Equipment And Machinery/Jul 2022/Report Code: A17020/Pages: 221/Tables: 93/Charts: 61*. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5846781/global-sandwich-panels-market-size-share-and>

5. Alisov B.P. Geographical types of climates. *Meteorology and Hydrology*. 1936:6. (rus).
6. Dippel I.V., Shabanov E.A. Technological features of fast-erected buildings from metal structures. *XIV All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists RUSSIA YOUNG*. 19–22 April 2022. (rus).
7. Kuznetsov D.N., Emelyanov D.I., Pavlenko T.M. Power sandwich-panel of the element-by-element assembly. *Building Mechanics and Structures*. 2020; 1(24):70–84. EDN DEMPXQ. (rus).
8. Pedro Andrade, Ove Lagerqvist, Rui Simões, Gabriel Sas. On global and local buckling response of structural angle sandwich panels. *Thin-Walled Structures*. 2022; 180(11):109835. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109835
9. Liana Ostetto, Romain Sousa, Paulo Fernandes, Hugo Rodrigues. Influence and effectiveness of horizontal diaphragms and cladding wall panels on the seismic behaviour of precast RC industrial buildings. *Engineering Structures*. 2023; 285:116046. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116046
10. Tilak Prasad Sah, Andrew William Lacey, Hong Hao. Prefabricated concrete sandwich and other lightweight wall panels for sustainable building construction: state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*. 2024; 89:109391. DOI: 10.1016/j.job.2024.109391
11. Behzad Fotovvati, Navid Namdari, Amir Dehghanghadikolaei. On Coating Techniques for Surface Protection : a Review. *J. Manuf. Mater. Process*. 2019; 3(1):28. DOI: 10.3390/jmmp3010028
12. Erofeev V.I., Monich D.V. Sound insulation properties of sandwich panels. *2020 IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng.* 896 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012005
13. Rozhnyatovsky G.I., Vanchugov I.M., Prokofiev V.A., Nurzhits S.I., Ishmurzin A.A. Gas processing industry of Russia, analysis and prospects of its development. *NefteGazokhimiya. Economics and Business*. 2020; 47-54. DOI: 10.24411/2310-8266-2020-10210. EDN GTGVLR. (rus).
14. Safonova T.Yu. Prospects of Russian oil and gas production in the Arctic: from collapse to development. *Creative Economy*. 2020; 14(10):2569-2590. DOI: 10.18334/ce.14.10.111085 (rus).
15. Orlov G.G., Korolchenko D.A., Korolchenko A.Ya. Economic evaluation of the effectiveness of safety structures to ensure explosion resistance of buildings and structures. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and explosion safety*. 2015; 24(6):51-57. EDN UMHSZH. (rus).
16. Sarvut T.O. Principles of habitat formation in the Arctic region. *MGSU Bulletin*. 2018; 13(2):130-140. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.130-140. EDN YQCPRC. (rus).
17. Golushkov O.V., Komarov S.L., Yanovich D.D. Sandwich-panels as an alternative to classical building materials and assessment of their competitiveness. *Bulletin of Belarusian-Russian University*. 2015; 3(48):127-134. (rus).
18. Kodzoev M.-B.H., Isachenko S.L. Sandwich-panel. Materials and constructions. *Bulletin of Science and Practice – Bulletin of Science and Practice scientific journal*. 2018; 4(2):224-227. DOI: 10.5281/zenodo.1173216. EDN YOQMRM. (rus).
19. Kobzev D.O. Sandwich-panels with insulation in the form of polyisocyanurate foam. *Journal of Science and Education Achievements*. 2018. URL: <https://interactive-plus.ru/e-articles/444/Action444-466979.pdf> (rus).
20. Kokanin S.V., Tsybakin S.V. Investigation of thermophysical properties of polystyrene-containing foams at their ageing. *Proceedings of the Kostroma State Agricultural Academy*. Karavaevo, Kostroma State Agricultural Academy, 2013; 78:57-64.
21. Mohammed Elamin, Bing Li, Tan K.T. Impact damage of composite sandwich structures in arctic condition. *Composite Structures*. 2018; 192(5). DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.03.015
22. Bobrov Yu.L., Ovcharenko E.G., Shoikhet B.M., Petukhova E.Yu. *Thermal insulation materials and structures : textbook for secondary vocational and technical educational institutions*. Moscow, INFRA-M, 2003; 268. (rus).
23. Melnikov V.S., Kirillov S.V., Melnikov M.V., Vanin S.A., Vasiliev V.G., Potemkin S.A. Mineral wool — thermal insulation of facade and roofing systems under conditions of spill and smoldering fire. *Internet journal "Naukovedenie"*. 2016; 8(6). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/63TVN616.pdf> (rus).
24. El Mehdi Abloui, Michał Malendowski, Wojciech Szymkuc, Zbigniew Pozorski. Determination of thermal properties of mineral wool required for the safety analysis of sandwich panels subjected to fire loads. *Materials*. 2023; 16(17):5852. DOI: 10.3390/ma16175852
25. Kamchatkatina V.M., Buzin G.V. Comparison of the most used insulation materials by thermophysical and economic characteristics. *Young thought : science, technology, innovation. Proceedings of the VII (XIII) All-Russian scientific and technical conference of students, masters, postgraduates and young scientists*. 2015. EDN WWZUNH. (rus).
26. Postovoy A.A. Analysing the quality of sandwich panels to ensure fire safety of buildings. *Young researcher Don*. 2021; 6(33):77-82. (rus).
27. Gurov A.A., Tolmacheva V.M. *Extruded polystyrene foam and mineral wool as a heat-insulating material : collection of scientific articles of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists, postgraduates, masters and bachelors*. Kursk, 2023; 200-203. EDN GODMPE.
28. Melnikov V.S., Kirillov S.V., Melnikov M.V., Vasiliev V.G., Vanin S.A., Potemkin S.A. Fire-structural examination of the damage of thermal insulation materials made of mineral wool and polyisocyanurate foam. *Internet Journal "Naukovedenie"*. 2016; 8(3):129.
29. Kuzmin V.A. Investigation of the possibilities of using reflective thermal insulation in multilayer sandwich panels taking into account multiple reflection. *Construction Materials*. 2017; 6:35-40. (rus).

30. Podgoretsky Yu.Yu. Study of the reliability of operation of easily resettable structures based on cellular polycarbonate sheets. *The Scientific Heritage*. 2020; 50:45-50. (rus).
31. Ulaeto S.B., Ravi R.P., Udoh I.I., Mathew G.M., Rajan T.P.D. Polymer-based coating for steel protection, highlighting metal-organic framework as functional actives. *A Review. Corros. Mater. Degrad.* 2023; 4:284-316. DOI: 10.3390/cmd4020015
32. Javet S. Features of prefabricated industrial buildings. *World Science*. 2023; 3(72):100-104. EDN BLXLXH. (rus).
33. Samarin O.D., Goryunov I.I., Teschenkova I.I. Influence of design characteristics of premises on the parameters of regulators of automated climate control systems. *Bulletin of MGSU*. 2015; 2:101-109. EDN TIVXVR.
34. Polandov Y.Kh., Dobrikov S.A., Kukin D.A. Test results of the lightly thrown structures. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(8):5-14. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14. EDN SAWFEZ (rus).
35. Gorev V.A., Salymova E.Y. Use of sandwich-panels as easily resettable structures in internal explosions in industrial buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(2):41-44. (rus).
36. Skorikov B., Stromilov N., Budko O., Rozhdestvensky A., Rogalskaya T. Use of sandwich panels as LSC during technical re-equipment of OPO. *Reglament*. 2015; 6 (44):42-43. EDN WBFLNR. (rus).
37. Komarov A.A. Destruction of buildings during emergency explosions of household gas. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2004; 5:15-23. EDN PMDPUJ. (rus).
38. Orlov G.G., Korolchenko D.A., Korolchenko A.Ya. Determination of Magnitude and Character of Explosive Loads at Application of Inertial Safety Structures. *Pozharovzryvbezopasnost /Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(4):47-55. EDN TVFFSB. (rus).
39. Korolchenko O.N., Korolchenko A.D. Determination of the opening pressure of lightly thrown structures taking into account wind loads. *Vestnik MSCU*. 2022; 17(7):914-921. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.914-921. EDN FFITIF. (rus).
40. Corcoran D., Climstein M., Whitting J., Del Vecchio L. Impact Force and Velocities for Kicking Strikes in Combat Sports : a Literature Review. *Sports*. 2024; 12(74):1-17. DOI: 10.3390/sports12030074
41. Youngcheol Kang, Sohaib Siddiqui, Sung Joon Suk, Seokho Chi, Changwan Kim. Trends of Fall Accidents in the U.S. Construction Industry. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2017; 143(8). DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.000133
42. Bunev V.A., Korzhavin A.A., Senachin P.K. Analysis of the influence of various factors on the characteristics of methane explosion hazard. *International Journal of Corrosion*. 2012; 3(1):5-16. DOI: 10.1155/2018/1258379. EDN YBZXUT. (rus).
43. Mishuev A.V., Khusnutdinov D.Z. *Methodology for calculating loads on buildings and structures under the influence of external emergency deflagration explosions*. Moscow, MGSU, 2004; 65. (rus).
44. Komarov A.A., Grokhotov M.A. Determination of the flame front propagation velocity in emergency deflagration explosions. *Labour Safety in Industry*. 2020; 7:7-13. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-7-7-13. EDN NWGKIV. (rus).

Поступила 24.07.2024, после доработки 15.09.2024;

принята к публикации 18.09.2024

Received July 24, 2024; Received in revised form September 15, 2024;

Accepted September 18, 2024

Информация об авторах

РАССКАЗОВ Евгений Степанович, аспирант, руководитель отдела охраны труда, промышленной безопасности и экологии, АО «Песко Энергия и Ресурсы», Россия, 123112, г. Москва, Пресненская наб., 12, оф. 2/91; ORCID: 0009-0008-7929-0712; e-mail: evgenyples@hotmail.com

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Evgenii S. RASSKAZOV, Postgraduate student, Head of the Department of Occupational Health, Safety and Environment, JSC "PESCO Energy & Resources", Presnenskaya nab., 12, Moscow, 123112, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-7929-0712; e-mail: evgenyples@hotmail.com

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interest.