Обоснование конструкции наружных стен из легких стальных тонкостенных конструкций исходя из обеспечения тепловой защиты зданий

В.Ю. Сергеев

*Главное управление МЧС России по Московской области (ГУ МЧС России по МО);
Московская область, г. Химки, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Описаны особенности конструкции наружных стен из ЛСТК (легкие стальные тонкостенные конструкции) для обеспечения тепловой изоляции зданий. Изучены методы отделки фасадов. Бытовое энергопотребление, на которое государство тратит до 40 % всех энергоресурсов страны, дало толчок развитию энергосберегающих технологий. Их применение позволит решить несколько проблем одновременно: сохранение природных энергетических ресурсов, изменение системы работы жилищно-коммунального хозяйства, снижение загрязнения окружающей среды, повышение рентабельности предприятий и реализация программ энергосбережения.

Материалы и методы. Разработаны не только новые материалы, но и целые системы ограждающих конструкций зданий, что требует исследования конструктивных и технологических характеристик фасадных систем. Государственные стандарты еще не разработаны для многих современных, относительно новых материалов для изоляционных конструкций наружных стен. Эта изоляция производится двумя основными методами. Первый — это так называемый «мокрый» вариант, с использованием гипсового раствора. Второй — «сухой» с применением конструктивных шарнирных элементов, обеспечивающих наличие воздушного зазора между внешним экраном и изоляцией.

Результаты. Российские дома имеют очень низкую энергоэффективность, поскольку стоимость электроэнергии, газа для потребителя самая низкая в Европе, потребление тепла (отопление, горячая вода) намного выше, чем в Европе. Современные фасадные системы не только позволяют изменить и украсить облик города за счет разнообразия стилей и цветов построенных городских объектов, они повышают теплоизоляционные свойства и сокращают сроки строительства.

Выводы. Для жилых и общественных зданий возможно применение конструкции наружных стен с вентилируемым фасадом, что подразумевает дополнительный слой теплоизоляции, стандартно используемый в конструкции данных фасадов. Конструкция ЛСТК используется не только для наружных стен, но и для перегородок внутри конструкции, помимо прочности, важное значение имеет звукоизоляция помещений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наружные стены, тепловая защита, здания, тепловые потери, тепловая изоляция, фасады, энергоэффективность, технологии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сергеев В.Ю. Обоснование конструкции наружных стен из легких стальных тонкостенных конструкций исходя из обеспечения тепловой защиты зданий // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. Вып. 3. Ст. 5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.3.5

A justification for the design of external thin light steel walls from the perspective of thermal protection of buildings

Viktor Yu. Sergeev

*Main Department of the Ministry of Emergency Situations of Russia in Moscow Region;
Moscow region, Khimki, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The article describes features of the design of external steel walls that ensure thermal insulation of buildings. Facade finishing methods are studied. Energy consumption by households, that consumes up to 40 % of all national energy resources, has triggered the development of energy-saving technologies. Their use will solve several problems at once, including conservation of natural energy resources, changing the system of housing and utility services, reducing environmental pollution, increasing the profitability of enterprises and the implementation of energy-saving programmes.

Materials and methods. Not only new materials have been developed, but also the whole systems of enclosure structures, which require the study of structural and technological characteristics of facade systems. National standards have not yet been developed for numerous modern, relatively new materials designated for the insulation of external walls. There are two principal methods of wall insulation. The first one is the so-called “wet” method, that entails the use of gypsum mortar. The second one is “dry”; it entails the use of structural hinges to make an air gap between the outer screen and insulation.

Results. Russian houses feature very low energy efficiency, and since the cost of electricity and gas for a Russian consumer is lowest in Europe, heat consumption (heating, hot water) is much higher than in Europe. Modern facade systems not only allow to change and beautify the appearance of the city due to a variety of styles and colours of its urban structures, they also improve thermal insulation properties and reduce construction time.

Conclusions. External walls, having ventilated facades, are applied in residential and public buildings. They have a supplementary layer of thermal insulation, which is normally used in the construction of these facades. A light steel thin construction is used to make external walls and partitions, in addition to strength they improve the sound insulation of premises.

KEYWORDS: external walls, thermal shielding, buildings, heat losses, thermal insulation, facades, energy efficiency, technologies

FOR CITATION: Sergeev V.Yu. A justification for the design of external thin light steel walls from the perspective of thermal protection of buildings. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2021; 11(3):5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.3.5 (rus.)

ВВЕДЕНИЕ

Учитывая низкие показатели энергоэффективности, Россия по-прежнему не уделяет должного внимания энергосберегающим технологиям. Существует несколько основных причин медленного распространения, а именно отсутствие интереса среди самих домовладельцев, просветительской работы по внедрению инструментов модернизации жилых зданий с примерами реальной экономии средств, активных государственных мер по стимулированию строительства энергоэффективных зданий, экономической и социальной поддержки строительных компаний, возводящих такие здания. Внедрение энергосберегающих технологий в России не всегда обходится без казусов. В Тюмени после присвоения дому статуса «энергоэффективного» коммунальные службы попытались «обкатать» умную систему в течение нескольких месяцев, но столкнулись с тем, что установленная система отопления не имела мощности, энергосберегающие лампы не горели, а замена трубопровода оставила людей без тепла на несколько месяцев и привела к перебоям в водоснабжении [1]. Остается надеяться, что подобное «внедрение» энергоэффективных технологий останется единичным, и, к сожалению, все эти проекты являются лишь экспериментальными. Внедрение технологий все еще не повсеместно, инновации часто внедряются для отчетности, существует нехватка экспертов для создания новых технологий. Вышеперечисленные факторы стали толчком для разработки новых технологических процессов и переоценки подходов к выбору материалов, используемых при монтажных и исполнительных работах [2]. Чтобы понять принципиальную разницу в выборе того или иного метода, необходимо знать, что представляют собой основные типы зданий.

Жилые здания могут быть «старомодными» кирпичными с толстыми стенами и интересным внешним дизайном. Это — дома, построенные в середине 20-х – начале 60-х годов, так называемые «сталинки» из керамического кирпича с деревянными потолками. Затем была эпоха старых пятиэтажных сборных домов, хрущевок, за которой последовала эпоха Брежнева, тоже со сборными домами, но с девятью этажами и лифтом.

Далее появились срубы, в которых использовалась теплоизоляция. Ключевая проблема этих зданий заключалась в том, что они не могли поддерживать температуру, а стыки между плитами были плохо загерметизированы. Мы можем найти решение глобальных экологических проблем в разработке и переходе на энергосберегающие техно-

логии при строительстве жилых и промышленных объектов. Энергия является одним из источников негативного воздействия на окружающую среду и человека. Она влияет на атмосферу — выбросы газов, потребление кислорода; гидросферу — создание искусственных водоемов, потребление воды, утилизация загрязненных жидких отходов; литосферу — истощение топливных ресурсов, изменение ландшафта, вырубка лесов, выбросы. Только около 30 % потенциальной энергии топлива сегодня преобразуется в электричество на электростанциях, а 70 % сбрасывается в окружающую среду, 10 % из которых — горячий газ, выбрасываемый через дымовые трубы.

Атомная энергетика после своего взрывного роста в конце XX в. в настоящее время переживает серьезный кризис из-за технических трудностей, связанных с выполнением повышенных требований к безопасности атомных электростанций, проблем с захоронением радиоактивных отходов, огромных затрат на строительство и, как следствие, высокой стоимости электроэнергии, вырабатываемой атомными электростанциями.

Существует также ряд серьезных проблем с гидроэнергетикой, особенно обусловленных затоплением земель при строительстве гидроэлектростанций.

По прогнозам экспертов, запасы природных энергоресурсов будут исчерпаны в течение ближайших пятидесяти лет, если ничего не изменится. Европа начала задумываться об экологических проблемах и экологических проектах после тяжелого энергетического кризиса 1970 годов, а в 1997 г. был подписан Киотский протокол, обязывающий все страны сократить выбросы углекислого газа в атмосферу.

В большинстве стран мира требования к повышению теплоизоляции зданий стали одной из важнейших целей государственного регулирования. Это позволяет не только экономить природные энергетические ресурсы, но и сохранять окружающую среду.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Россия обладает огромным потенциалом для развития энергосберегающих технологий, несмотря на то, что она отстает в этой области от европейских стран¹.

В середине 1970-х и до начала 1990-х годов дома 137 серии строились из более качественных

¹ Электронный журнал «ПРОНЕДРА». URL: <https://pronedra.ru/articles>

плит и постепенно вытеснялись новым вариантом высотного дома — с монолитными перекрытиями. Это — монолитные каркасы, облицованные более легкими плитами, которые лучше сохраняют тепло. Технология развивалась, и сейчас строительный рынок предлагает дома с бесшовными фасадами и улучшенной звуко- и теплоизоляцией. К ним относятся монолитно-каркасные дома с хорошей теплоизоляцией, поскольку монолитный бетон, который заливается прямо в опалубку на строительной площадке, облицован теплоизоляцией на основе стекловаты, которая сверху обшивается фасадными панелями, снижающими теплопотери здания [3].

Именно развитие монолитно-каркасного строительства дает возможность использования огромного разнообразия фасадных систем. После принятия СНиП 23-02-2003 удалось повысить энергоэффективность строящихся домов, так как изменились нормы и правила к уровню теплозащиты зданий с целью экономии энергии.

При этом должны соблюдаться санитарно-гигиенические нормы микроклимата помещений и оптимальные параметры долговечности ограждающих конструкций. В 2009 г. Государственной Думой принят Федеральный закон «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности», в котором определен комплекс мер по реализации экономии за счет энергоэффективных товаров и услуг.

Помимо разнообразия материалов для гипсокартона, существует также несколько способов крепления облицовочных элементов к фасаду [4]. Анализ информации позволил классифицировать разнообразие вентилируемых фасадов, показанных на рис. 1.

Для каждого облицовочного материала необходимо выбрать подходящую конструкцию каркаса [5], состоящую из оцинкованной стали, нержавеющей стали и алюминия. Для керамогранита, фиброцемента, композитов и натурального камня используется менее дорогая и пожаробезопасная подсистема из оцинкованной стали. С целью облицовки домов высотой более 50 м применяется самая дорогая и прочная подсистема из нержавеющей стали.

При строительстве и реконструкции старых домов рекомендуется использовать алюминиевую систему, так как это — самый легкий вариант каркасной системы, хотя ее недостатком является низкая температура плавления, и она применяется не во всех регионах из-за нарушения противопожарных норм. Если система ориентирована на кирпич или бетон, крепление производится непосредственно в стене².

² Энергосберегающие технологии в России и за рубежом // Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. URL: https://stroim.mos.ru/builder_science/energoberegauschie-tehnologii-v-rossii-i-za-rubezhom

Для пористых материалов — керамзитобетонных блоков, пеноблоков — система может быть установлена только в межэтажном перекрытии. Внешняя облицовка защищает стену от внешних воздействий, таких как осадки и механические нагрузки, а влага, которая накапливается в массе здания и внутри помещения, снова удаляется.

Этот пароизоляционный эффект надежно защищает от конденсата, пара, влаги и создает приятный микроклимат в доме. Благодаря изоляции, размещенной под облицовкой, потери тепла снижаются в 2–3 раза, а срок службы стены увеличивается за счет сокращения циклов замерзания.

Второй рассматриваемый способ является «мокрым» с использованием гипсового раствора. Он наиболее популярен при утеплении и реконструкции старых зданий, так как позволяет восстановить первоначальный вид с помощью слоя штукатурки, но также часто применяется в новых зданиях из-за более дешевого монтажа. Как и каркасный фасад, этот тип изоляции дает возможность пару беспрепятственно выходить из дома, вследствие чего дом может «дышать», и влага не скапливается внутри [6].

Оштукатуренные фасады не требуют дополнительного каркаса, а теплоизоляционные материалы наносятся непосредственно на стену в рулонах или листах. Изоляционный материал раскатывается по поверхности, или вырезаются элементы и крепятся к стене с помощью специальных дюбелей, предотвращающих провисание материала. Теплоизоляционные плиты также крепятся к стене с помощью специальных крепежей с круглыми шляпками.

Иногда оба вида изоляции могут быть приклеены к стене с помощью специального отвердевающего клея. После крепления изоляции поверхность герметизируется, и наносится или облицовывается окончательный защитный слой из различных материалов. После анализа многочисленных мокрых фасадов все типы можно условно классифицировать, как показано на рис. 2.

«Мокрый» фасад проще называют штукатурным фасадом или еще «пирогом», так как он представляет собой конструкцию слоев, наносимых постепенно один за другим: сначала теплоизоляция, затем клей и пластиковые дюбеля, далее армирующую стеклосетку закрепляют клеевым раствором, потом следует основной слой штукатурки, грунтовки и краски.

Главные преимущества штукатурных фасадов — небольшой вес, что исключает дополнительную нагрузку на фундамент, простота монтажа и, как говорилось ранее, наиболее дешевый способ монтажа и самой системы. Плотное прилегание к стене и прилегание других слоев «пирога» друг к другу значительно уменьшают возникновение мостиков холода, следовательно, достигаются более высокие показатели энергоэффективности. Преимуще-

Рис. 1. Способы отделки вентилируемых фасадов

ство теплоизоляционных плит из минеральной ваты по сравнению с рулонными утеплителями заключается в том, что выравнивание поверхности под штукатурку практически сводится к минимуму [7].

В отличие от вентилируемых и штукатурных фасадов, где они не несут нагрузку и не являются конструктивным элементом, существует система, которая выполняет прежде всего теплозащитные функции, а также стала частью каркаса здания. Стены зданий по технологии ЛСТК (легкие стальные тонкостенные конструкции) представляют собой каркасную панель с наполнителем внутри из минеральной

ваты и двухсторонней обшивкой. Каркас стен ЛСТК состоит из стоечных С-образных термопрофилей с шагом 600 мм, закрепленных в поперечные направляющие профили П-образного сечения. В каркасной системе прочность, жесткость и устойчивость здания обеспечивают пространственные рамные каркасы. Жесткость невысоких зданий обеспечивается поперечными рамами — фермами, а для устойчивости в продольном направлении используют жесткий диск покрытия — вертикальные металлические связи жесткости крестообразного или portalного очертания.

Рис. 2. Классификация применяемых мокрых способов отделки фасадов

При конструктивной каркасной системе, преобладающей в промышленном строительстве, ключевую роль отводят ограждающим конструкциям.

ЛСТК представляют собой каркас из тонкой стали толщиной 3–4 мм. Данная методика появилась и давно развивается в странах Европы и США, а в России пока не укрепила свои позиции из-за недостатка информативности. Но за тяжелый последний год, когда появилась жизненно важная задача построить за минимальный период большое число госпиталей и больниц, да еще и по бюджетному варианту, ЛСТК стали одним из решающих и наилучших вариантов.

Впервые термин ЛСТК был использован в 50-х годах в Канаде, когда правительство разрабатывало план по строительству большого количества малоэтажных домов, и после экспериментальной постройки нескольких десятков зданий метод подтвердил свои преимущества перед классическим строительством. Конструкция ЛСТК получила широкое признание и стала использоваться для строительства жилых зданий небольшой высотности, для складов, автостоянок, торговых центров, больниц, школ и др. Объясняется такая популярность несколькими положительными моментами — здания, возведенные с применением ЛСТК, отличаются геометрической точностью, легкостью конструкции и отсутствием усадки.

Рассмотрим основные схемы ограждающих конструкций ЛСТК [8]. Конструкция имеет основные составляющие — это наружная стена, толщина которой определяется сечением профиля и рассчитывается исходя из теплотехнических требований и требуемой

толщины утепляющего слоя. Шаг профиля изначально рассчитывался 600 мм, это — стандартная ширина большинства производимых теплоизоляционных плит, если необходимо увеличить несущую способность каркаса при больших нагрузках на наружные стены, шаг профилей ЛСТК может быть уменьшен до 400 мм. Максимальный шаг стоек каркаса, шаг и длины балок, сечения элементов, допустимые высоты конструкций, а также конструкции узлов соединений определяются расчетом. В большинстве случаев с наружной стороны под обшивкой монтируется гидро-ветрозащитный слой из специальных рулонных материалов, с внутренней стороны непосредственно под обшивкой монтируется пароизоляционный слой для обеспечения защиты теплоизоляционного материала от насыщения парами воды, поступающими из помещения [9]. Монтаж наружных стен ведется укрупненными стеновыми панелями и может монтироваться как напрямую на стойки силового каркаса без воздушного зазора, так и через горизонтальные и вертикальные обрешетки — с воздушным зазором. Минимальная толщина утепляющего слоя определяется по расчету требуемого сопротивления теплопередаче в зависимости от средней температуры, района строительства, характеристик отопительного периода [10], а также зависит от теплопроводности материалов внутренней и внешней обшивки.

Для пола во избежание эффекта зыбкости при больших пролетах между балками в шахматном порядке устанавливаются связи из профилей-перемычек, крепление панели пола к стеновой панели осуществляется через слой уплотнителя, а опирание панели пола на фундамент осущест-

вляется через слой гидроизоляции, например два слоя рубероида³. Требования к перекрытиям и их конструктивные особенности практически не отличаются от конструкции пола с разницей в том, что при отсутствии внешних атмосферных воздействий пароизоляционный слой может монтироваться как с внешней, так и с внутренней стороны каркаса. Расчет каркаса крыши проводится с учетом устойчивости и гибкости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим положительные стороны конструкций стен из ЛСТК.

1. Каркасная технология ЛСТК явилась революционной технологией для архитектурных и конструктивных решений, открыв широкие архитектурные возможности и позволив создавать объекты практически любых форм с применением любых облицовочных материалов. Конструкции способны перекрывать пролеты до 21 м без промежуточных опор по кровле и до 8 м по высоте межэтажных перекрытий, позволяют размещать коммуникации и электрооборудование внутри каркасных стен.

2. Каркасное строительство дает возможность снизить время строительства в 10 раз по сравнению с более традиционными методами. Например, в 2020 г. быстровозводимые госпитали по всей России были возведены за 40–60 дней под ключ. Важным фактором служит всесезонный монтаж, профили подлежат эксплуатации при температуре наружного воздуха от –65 до +55 °С. Малый вес конструкций уменьшает расходы на доставку, до 80 % каркасных конструкций собираются перед доставкой на объект, а крупные узлы — непосредственно на строительной площадке перед установкой, что актуально при чрезвычайных ситуациях, связанных с переселением людей, при этом профили поставляются транспортными пакетами на подкладках из древесины и компактно складываются на складах не более чем в три яруса.

3. Простота сборки, компактность комплектующих и отсутствие необходимости в грузоподъемной и тяжелой грузовой технике позволяют успешно осуществлять строительство в условиях тесной городской застройки и труднодоступных мест, например в горах. Отсутствие тяжелой техники на строительной площадке сокращает вмешательство в окружающий ландшафт до минимума [11].

4. Профили ЛСТК имеют высокую прочность и при средней плотности стали 7,85 г/см, вес 1 м² несущего профиля составляет около 30–45 кг, а вес 1 м² готового здания в среднем составляет 150 кг. Легкость конструкции и невысокая ее нагрузка на фун-

дамент позволяют снизить затраты на фундамент или использовать его облегченную форму и расширить возможности строительства на нестабильных грунтах, а также проводить реконструкцию старых зданий с повышением этажности. Отсутствие усадки и осадки зданий не задерживает процесс строительства, и можно сразу переходить к внутренней и внешней отделке помещений.

5. При проектировании конструкций ЛСТК используются современные программы и новейшие методы, что дает возможность производить профиль с точностью до 1 мм в продольном направлении и с точностью до сотых долей миллиметра по сечению, что существенно облегчает внутреннюю и внешнюю отделку здания и исключает работы по предварительному выравниванию каркаса и подгонке конструкции и материалов.

6. Прочная конструкция каркаса, работающая по принципу шарнира, способна выдержать серьезные динамические нагрузки, что делает его применимым в районах с повышенной геологической активностью в условиях повышенной сейсмической опасности.

7. Требования по долговечности здания устанавливаются в каждом проекте индивидуально, исходя из особенностей проекта, но в основном обеспечиваются за счет оцинкованной стали, антикоррозийной защиты и агрессивного воздействия газообразной среды в соответствии со СНиП 2.03.11 для несущих и ограждающих конструкций из оцинкованного стального проката. Срок службы каркаса ЛСТК составляет от 50 до 80 лет и более и не подвержен биологическим воздействиям, устойчив к грибкам, насекомым и грызунам [12].

8. При проектировании конструкций ЛСТК применяют правила противопожарной безопасности, а также дополнительные требования пожарной безопасности, установленные в СНиП⁴ на здания различного назначения. Каркасы из ЛСТК с типовой отделкой без использования легковоспламеняющихся материалов с успехом проходят пожарные испытания и относятся к сооружениям III степени огнестойкости с пределом огнестойкости R 45/E 15 и классом пожарной опасности K0 (45). В зонах с наиболее высоким риском воспламенения — котельные, кухни, может применяться дополнительная защита в виде еще одного слоя огнестойких плит. Кроме того, конструктивные особенности ЛСТК отвечают высоким требованиям по взрывобезопасности, и поэтому они широко применяются для строительства котельных, компрессорных, заправочных станций и других специальных зданий.

9. Рассматривая ЛСТК с точки зрения энергоэффективности, по сравнению с любой другой

³ Энергосберегающий дом: соблюдение энергобаланса, проектирование, принципы возведения. URL: https://m-strana.ru/articles/energoberegayushchiy-dom/?utm_source=copy&utm_medium=direct&utm_campaign=copy_from_site

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

строительной технологией, показатели теплопотерь были наименьшими, так как использование термопрофилей, теплоизоляции, парозащитной и ветрозащитной мембран в стенах и перекрытиях позволяет устроить из ограждающих конструкций своеобразный термос, который в закрытом состоянии может хранить тепло до 2–3 суток, не требуя дополнительного отопления, а в жаркое время года существенно снизить потребность в кондиционировании [13].

10. Конструкцию ЛСТК смело можно назвать экологичной, так как каркас поддается вторичной переработке, как и минераловатные плиты внутри каркаса могут быть полностью переработаны в новую продукцию. Поскольку профили и все комплектующие на строительную площадку приходят в количестве, строго рассчитанном под данный проект, строительных отходов практически не остается, что тоже влияет на экологичность⁵.

11. В качестве наружной обшивки каркаса стен на основе ЛСТК может применяться большинство современных атмосферостойких материалов: сайдинг, профнастил, сэндвич-панели, фиброцементные панели и др. Внутренняя обшивка также имеет огромное разнообразие используемых материалов, выбор которых остается за потребителем, но, как правило, предпочтения отдаются экологически чистым материалам. Внутри каркаса в качестве утеплителя используются минеральная или базальтовая вата, которая считается антиаллергенной, как и сталь для каркаса.

12. Снижение совокупных расходов на строительство, энергосбережение при эксплуатации здания делает технологию строительства ЛСТК наиболее экономичной среди существующих.

Детально разобрав, что собой представляет конструкция ЛСТК и каковы ее конструктивные особенности, невозможно не упомянуть и о недостатках, хотя их не так много, и большинство из них возможно исправить внесением изменений в конструкцию при уточненных расчетах свойств материалов:

1. Тонкая сталь 3–4 мм, из-за которой конструкция будет менее прочной, настораживает многих архитекторов и конструкторов. Но в готовом виде конструкция имеет довольно прочный и жесткий каркас, способный выдержать большие нагрузки.

2. Недостаточно высокий срок эксплуатации 50–120 лет можно назвать средним, но он не может сравниться с бетонными и кирпичными постройками [14]. Однако данный способ, самый быстровозводимый и практически единственный, выполняет задачу строительства в сжатые сроки.

3. Недостатки конструкции, связанные с вопросами строительной физики — акустикой и тепло-техникой [13]. Наличие «мостиков холода» по ре-

зультатам тепловизионного обследования требует корректировки существующих типовых решений и необходимости разделения их по климатическим зонам, а также необходимости всестороннего исследования определяющих основных моментов, повышения качества проектирования конструкций ЛСТК и качества строительно-монтажных работ.

4. Большое количество контрафактной продукции стальных профилей несоответствующего качества может привести к катастрофическим последствиям в процессе эксплуатации каркасных зданий. Поэтому к выбору материала и застройщика для ЛСТК следует подходить основательно и работать только с производителями и строителями, имеющими соответствующие лицензии и разрешения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определение теплотехнических характеристик зданий и сооружений всегда является сложной инженерной задачей и требует многодневной работы нескольких профильных специалистов. Основными документами для проведения теплотехнического расчета вентилируемых фасадов служат СП 50.13330.2012 и СП 23-101-2004, а также «Рекомендации по проектированию навесных фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором для нового строительства и реконструкции зданий» [15] и подобные рекомендации, которых немало. Сейчас появилось много специальных программ, которые существенно облегчают данные расчеты, а итоговый результат формируется практически мгновенно, включая наглядную инфографику, а многие программы, такие как CalculiX, Elmer, Salome для расчета температурных полей вентилируемого фасада, можно найти в открытом доступе. В качестве демонстрации сравнения преимуществ вышеперечисленных фасадных систем воспользуемся упрощенным расчетом одного из онлайн-калькуляторов, который не только рассчитает, какой теплоизоляционный материал и в каком количестве надо применить, но и выдаст экономическую выгоду от применения той или иной системы [16]. Для примера возьмем одинаковые параметры, например, это будет двухэтажный дом в Московской области размером 5 на 7 м, с высотой этажа 2,4 м и общей высотой до конька 6,5 м, из керамического кирпича с холодным подвалом, неутепленным чердаком и холодной крышей. Закладываем данные в калькулятор, а также то, что необходимо утеплить дом вентилируемым фасадом, утеплить подвал, крышу и чердак.

Также закладываем в калькулятор информацию о том, что дом отапливается газовым котлом и желаемая температура внутри помещений должна быть 23 °С, стоимость энергоресурса для расчета берем 6 руб./м³. Программа мгновенно анализирует заложенные данные и показывает, какой материал и в каком количестве необходимо закупить для утепления

⁵ Экологические проблемы энергосбережения. URL: <https://helpiks.org/4-72264.html>

всех участков дома, при этом можно видеть, что потеря тепла через несущие стены сократится на 89 %, через перекрытия на 91 %, а через пол на 92 % [17]. Расходы на газ сократятся на 1302 руб. в мес., и соответственно за год экономия составит 15 629 руб. Калькулятор приводит стоимость материала определенного производителя по его базовой цене, в этом случае окупаемость затрат на материалы наступит через 59 мес. [18].

Изменив информацию на штукатурную систему утепления фасада, при этом данные о подвале и крыше не изменились, калькулятор дает сведения, что потери тепла сокращаются практически на те же показатели, но окупаемость затрат на материалы наступит через 49 мес., это показывает, что эта система не менее эффективна, но значительно дешевле вентилируемого фасада.

При внесении информации о каркасной системе фасада с дополнительным утеплением потери тепла через стены сокращаются на 93 %, а окупаемость затрат на материалы наступает через 26 мес., что показывает наибольшую тепло-эффективность системы ЛСТК с дополнительным утеплением [19].

Конечно, данный калькулятор — маркетинговый и направлен на привлечение покупателя к продукции определенного производителя, но он — наглядный пример, как просто и доходчиво можно показать пути экономии на содержание здания [20], а самое главное — каким путем можно достигнуть комфортных условий проживания без холодных стен и сквозняков⁶.

Теплозащитные свойства ограждений ЛСТК определяются двумя величинами:

- R_o — сопротивление теплопередаче, определяет сопротивление ограждения передаче тепла, рассчитывается для зимних условий;
- D — теплоустойчивость, характеризует сопротивляемость ограждения передаче изменяющихся во времени периодических тепловых воздействий, рассчитывается для летних условий.

R_o должно быть равным или больше минимально допустимого по санитарно-гигиеническим нормам требуемого сопротивления $R_{отр}$ теплопередаче:

$$R_o \geq R_{отр}. \quad (1)$$

Сложность расчета именно для ЛСТК обусловлена большой разницей величин расчетных коэффициентов стали (58 Вт/м°C) и минераловатных утеплителей (0,03–0,1 Вт/м°C), поэтому теплотехнический расчет выполняют на основе:

- расчета температурных полей;
- приведенного теплового сопротивления;
- по результатам опытных исследований.

⁶ Энергосберегающий дом: соблюдение энергобаланса, проектирование, принципы возведения. URL : https://m-stra.ru/articles/energoberegayushchiy-dom/?utm_source=copy&utm_medium=direct&utm_campaign=copy_from_site

Требуемое сопротивление теплопередаче $R_{отр}$ определим по формуле:

$$R_{отр} = \frac{(t_{int} - t_{ext})^n}{\Delta t^n \alpha_B}, \quad (2)$$

где n — коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху, принимаемый по таблице СНиП 23-02-2003; t_{int} — расчетная температура внутреннего воздуха, принимаемая согласно ГОСТ 12.1.005-88, °C; t_{ext} — расчетная температура наружного воздуха, равная средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 по СНиП 2.01.01-82, °C; Δt^n — нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции, принимаем по СНиП 23-02-2003, °C; α_B — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, принимаемый по СНиП 23-02-2003.

В этой формуле $\Delta t^n \alpha_B$ можно заменить равным ему потоком тепла через ограждение:

$$q^n = \Delta t^n \alpha_B \quad (3)$$

и записать $R_{отр}$ в виде:

$$R_{отр} = \frac{(t_{int} - t_{ext})^n}{q^n}. \quad (4)$$

Значение q^n для города Санкт-Петербурга находим по СНиП 23-02-2003, и тогда требуемое сопротивление теплопередаче равняется:

$$R_{отр} = \frac{(20 - (-26)) \cdot 1}{52,3} = 0,88 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Градусо-сутки отопительного периода определим по формуле:

$$D_d = (t_{int} - t_{ht}) z_{ht}, \quad (5)$$

где t_{ht} — средняя температура $-1,8$ °C, и продолжительность 220 суток периода со среднесуточной температурой воздуха ниже или равна 8 °C;

$$D_d = (20 - (-1,8)) \cdot 220 = 479.$$

По СНиП 23-02-2003 требуемое сопротивление теплопередаче

$$R_{отр} = 3,08 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Сопротивление теплопередаче R_o , м²·°C/Вт, ограждающей конструкции можно рассчитать по формуле:

$$R_o = \frac{1}{\alpha_{in}} + R_k + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (6)$$

где α_B — коэффициент теплопередачи внутренней поверхности ограждающих конструкций по СНиП 23-02-2003; α_n — коэффициент теплопередачи (для зимних условий) наружной поверхности ограждающей конструкции Вт/(м²·°C); R_k — термическое сопротивление ограждающей конструкции, м²·°C/Вт.

Термическое сопротивление определяем по формуле:

$$R_k = \delta / \lambda, \quad (7)$$

где δ — толщина слоя, м; λ — расчетный коэффициент теплопроводности материала слоя, Вт/(м²·°C).

Термическое сопротивление ограждающей конструкции с последовательно расположенными однородными слоями вычисляем как сумму термических сопротивлений отдельных слоев:

$$R_k = R_1 + R_2 + R_{в.п}, \quad (8)$$

где R_1, R_2 — термическое сопротивление отдельных слоев ограждающей конструкции, м²·°C/Вт; $R_{в.п}$ — термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки, м²·°C/Вт.

Для ЛСТК, где конструкция состоит из неоднородных слоев применяемых материалов (теплоизоляция, профили, стержни, болты и т.д.), условно ее расчлняют и представляют в виде цепи из тепловых сопротивлений и рассчитывают приведенное тепловое сопротивление $P\tau$ °C/Вт.

Причем участки с параллельными ветвями цепи с тепловыми сопротивлениями P^I и P^{II} рассчитываются по формуле:

$$P_1 = \frac{(P^I P^{II})}{(P^I + P^{II})}. \quad (9)$$

А участки с последовательными тепловыми сопротивлениями — суммированием их тепловых сопротивлений.

Приведенное термическое сопротивление R_k , м²·°C/Вт, определяют по формуле:

$$R_k = P^v A, \quad (10)$$

где A — общая площадь конструкции, равная сумме площадей отдельных участков, м².

Приведенное сопротивление теплопередаче неоднородной ограждающей конструкции или ее фрагмента можно установить следующим образом:

$$R_o = \frac{n(t_{int} - t_{ext})A}{Q}, \quad (11)$$

где A — площадь неоднородной ограждающей конструкции или ее фрагмента, м²; Q — суммарный тепловой поток через конструкцию или ее фрагмент площадью A , Вт, определяемый на основе расчета температурного поля на ЭВМ, либо экспериментально ГОСТ 26254 или ГОСТ 26602.1 с внутренней стороны; n — коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций к наружному воздуху, принимаемый по СНиП 23-02 с учетом примечания; t_{int} — расчетная температура внутреннего воздуха, °C; t_{ext} — расчетная температура наружного воздуха, °C.

Приведенное сопротивление теплопередаче:

$$R_o = \frac{A}{\sum \left(\frac{A}{R_{o,i}} \right)}, \quad (12)$$

где A — площадь i -го участка, м²; $R_{o,i}$ — приведенное сопротивление передаче, м²·°C/Вт; A — общая площадь конструкции, равная сумме площадей отдельных участков, м²; m — число участков ограждающей конструкции с различным приведенным сопротивлением теплопередаче.

Теперь осталось подставить в формулу площади число участков, и мы получим искомую величину реального сопротивления теплопередаче конструкции⁷.

Далее, сравнив вычисленную величину с нормативным значением, можно сделать выводы: удовлетворяет ли ограждающая конструкция санитарно-гигиеническим нормам по тепловой защите и выполняется ли условие по теплозащите ограждающей конструкции. Для каждого слоя ограждения показатель тепловой инерции рассчитывается по формуле:

$$D = R_s, \quad (13)$$

где R — термическое сопротивление слоя ограждающей конструкции; s — расчетный коэффициент теплоусвоения материала отдельного слоя ограждающей конструкции.

Для многослойной ограждающей конструкции:

$$D = D_1 + D_2 + D_n, \quad (14)$$

где D_1, D_2, D_n — расчетные значения тепловой инерции отдельных слоев ограждающей конструкции.

Расчетный коэффициент теплоусвоения воздушной прослойки принимается равным нулю. Слои конструкции, расположенные между воздушной прослойкой, вентилируемой наружным воздухом, и наружной поверхностью ограждающей конструкции, не учитываются⁸. На величину коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности влияют только теплотехнические свойства материалов ограждения, расположенных в слое резких колебаний, для которого $D = 1$.

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- определение теплотехнических характеристик зданий и сооружений всегда является сложной инженерной задачей;
- при использовании систем вентилируемого фасада, штукатурного фасада и системы ЛСТК

⁷ Методика теплотехнического расчета наружных стен зданий с навесными фасадными системами «Металл профиль». Омск : СиБАДИ, Испытательный центр «Стройтест-Сибади». URL: https://www.staltd.ru/media/metodika_rascheta_teplotehnik_vf.pdf

⁸ Тепловая защита зданий — теплотехнический калькулятор. URL: https://raschetsten.ru/teplotehnikeskij-raschet/?utm_source

можно достигнуть сокращения потерь тепла через несущие стены почти на 90 %, через перекрытия и пол почти на 93 %, а расходы на энергоресурсы существенно сокращаются, что позволяет через несколько лет окупить затраты на материал и монтаж систем утепления [20];

- системы ЛСТК по экономическим затратам получаются самыми выгодными для строительства;
- термическое сопротивление ограждающей конструкции ЛСТК с последовательно расположенными однородными слоями определяем как сумму термических сопротивлений отдельных слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Береговой А.М.* Здания с энергосберегающими конструкциями : дис. ... д-ра техн. наук. Пенза : ПГУАиС, 2005. 344 с.
2. *Табуничиков Ю.А.* Пассивные многоэтажные здания // Здания высоких технологий. 2013. Т. 2. № 2. С. 12–21.
3. *Клименко А.В., Гаши Е.Г.* Проблемы повышения эффективности коммунальной теплоэнергетики на примере объектов жилищно-коммунального хозяйства Центрального округа Москвы // Теплоэнергетика. 2004. № 6. С. 54–59.
4. *Башмаков И.А.* Повышение энергоэффективности в российской промышленности // Центр по эффективному использованию энергии (ЦЭНЭФ). М., 2013. 35 с.
5. *Безбородов Е.Л.* Наружные стены с каркасом из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) // Инновации и инвестиции. 2018. № 2. С. 186–190.
6. *Ресин В.И.* Эффективные методы управления энергосбережением в строительстве // Архитектура и строительство Москвы. 2003. Т. 508–509. № 2–3. С. 7–13.
7. *Елохов А.Е.* Энергопассивное домостроение в России // Стройпрофиль. 2013. № 2 (105).
8. *Подольн Л.А.* Энергоэффективность жилых зданий нового поколения : дис. ... канд. техн. наук. М. : Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, 2005. 156 с.
9. *Табуничиков Ю.А., Бродач М.М.* Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М. : АВОК-ПРЕСС, 2015. 169 с.
10. *Климова Г.Н., Литвак В.В.* Семь проблем и семь ключей энергосбережения: монография. Томск : Красное знамя, 2013. 146 с.
11. *Хомутов А.Ф.* Теплоизоляционные свойства наружных ограждений комплексного типа с применением монопанелей : дис. ... канд. техн. наук. М., 1981. 133 с.
12. *Васильев Г.П.* Результаты натурных исследований теплового режима экспериментального энергоэффективного дома // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2002. № 6 (41). С. 3–5.
13. *Иванов Г.С., Спиридонов А.В., Хромец Д.Ю., Морозов А.М.* Энергосбережение при реставрации и капитальном ремонте зданий // Жилищное строительство. 2002. № 1. С. 7–9.
14. *Макаров Е.В., Румянцев В.В., Шкулев С.П.* Натурные обследования наружных ограждающих конструкций зданий с помощью тепловизора // Исследования по теплофизическим проблемам Севера : сб. докл. 1999. С. 52–55.
15. *Гурьев В.В., Хайнер С.П., Дмитриев А.Н. и др.* Влияние некоторых параметров пористоволокнистых утеплителей на экономичность теплозащиты зданий // Промышленное и гражданское строительство. 1998. № 5. С. 53–55.
16. *Цветков О.В.* Системы наружной теплоизоляции с защитно-декоративным слоем по утеплителю // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 1999. № 5. С. 32–33.
17. *Кулачков В.Н.* Комплексный подход к энергосбережению в строительстве // Строительные материалы. 2000. № 8. С. 14–15.
18. *Девятаева Г.В.* Технология реконструкции и модернизации зданий. М. : ИНФРА-М, 2003. С. 15–18.
19. *Жога Е.О., Нам В.В., Чубаркина И.Ю.* Анализ «умных» технологий в сфере ЖКХ // Сборник материалов IX Всерос. науч.-практ. конф. М. : МИСИ-МГСУ. 2018. С. 50–55.
20. *Григоренко К.А., Петренева О.В.* Энергосберегающие технологии при реконструкции домов массовых серий // Наука, образование и культура. 2017. Т. 2. № 5 (20). С. 64–66.

Поступила в редакцию 3 августа 2021 г.

Принята в доработанном виде 24 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2021 г.

ОБ АВТОРЕ: **Виктор Юрьевич Сергеев** — полковник внутренней службы, заместитель начальника управления надзорной деятельности и профилактической работы, заместитель главного государственного инспектора

Московской области по пожарному надзору; **Главное управление МЧС России по Московской области (ГУ МЧС России по МО)**; Московская область, 141501, г. Химки, Новокуркинское шоссе, влад. 34; vs720@mail.ru.

INTRODUCTION

Russia still does not pay enough attention to energy-saving technologies. Hence, its energy-saving remains low. Several obstacles decelerate the integration of energy efficient technologies in Russia, including the lack of interest among homeowners, no awareness generation effort focused on the need to implement modernization technologies for residential buildings and showcase real cost savings, no intensive government measures to stimulate the construction of energy-efficient buildings, no economic or social support for companies engaged in the construction of energy-efficient buildings. The introduction of energy-saving technologies in Russia is accompanied by extraordinary occurrences. In Tyumen, after the house had been assigned the status of “energy efficient”, the utility service company attempted to “test” the smart system for several months, but it had to acknowledge the fact that the heating system did not have enough capacity, energy-saving bulbs gave out no light, the pipeline replacement project left people without heat for several months and caused water supply interruptions [1]. We are still hopeful that this case of “introduction” of energy efficient technologies will remain an exception, but, unfortunately, all these projects are experimental. Introduction of such technologies is still not ubiquitous; innovations are often introduced formally, and there is a shortage of experts capable of developing new technologies. The above factors have become the impetus for the development of new technological processes and reassessment of approaches to the choice of materials used in installation and construction [2]. To understand the fundamental difference between particular methods, one needs to find out the main types of buildings.

Residential buildings include “old fashioned” brick structures with thick walls and interesting exterior designs. These are houses built in the mid-20s – early 60s, the so-called “stalinkas”, famous for ceramic brickwork and wooden ceilings. They were followed by five-story prefabricated houses, or the Khrushchev-era residential houses, which were, in their turn, followed by the Brezhnev era, that produced prefabricated houses that had nine floors and an elevator.

Log houses, that had thermal insulation, appeared later. Their key problem was that they could not maintain the temperature and the joints between the slabs were poorly sealed. We can find a solution to global environmental problems: that is the development and transition to energy-saving technologies in the field of construction of residential and industrial facilities. Energy is a source of the negative impact on the environment and humans. It affects the atmosphere through gas emissions, oxygen consumption; it deteriorates the hydrosphere through the construction of artificial reservoirs, water consumption, disposal of contaminated liquid waste; it hurts the lithosphere

through the depletion of fuel resources, landscape change, deforestation, and emissions. Today only 30 % of the potential energy of fuel is converted to electricity at power plants, while 70 % is discharged into the environment, 10 % of it is emitted through chimneys as hot gas.

After the explosive growth at the end of the 20th century, nuclear energy is currently facing a serious crisis due to technical difficulties associated with tightened safety standards for nuclear power plants, radioactive waste disposal problems, huge construction costs and, as a result, high costs of electricity generated by nuclear power plants.

There are also serious problems with hydraulic power due to floods during the construction of hydraulic power plants.

According to experts’ forecasts, natural energy resources will be depleted within the next fifty years, if nothing changes. Europe began to think about environmental problems and environmental projects after a severe energy crisis in the 1970s, and in 1997 the Kyoto Protocol was signed, obliging all countries to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere.

In most countries of the world, requirements aimed at improving the thermal insulation of buildings have become one of the most important goals of the government regulation. Not only does it allow to save natural energy resources, but also to preserve the environment.

MATERIALS AND METHODS

Russia has enormous potential for the development of energy-saving technologies, despite the fact that it lags behind European countries in this area¹.

In the mid-1970s and until the early 1990s, houses of the 137 series were built from better quality slabs, and they were gradually replaced by a new version of a high-rise building, the one that had monolithic ceilings. These are monolithic frames lined with lighter slabs that retain heat better. The technology has evolved and now the construction market offers houses with seamless facades and better sound and heat insulation. These include cast-in-place concrete frame buildings with good thermal insulation, since monolithic concrete, poured directly into the formwork at the construction site, is lined with glass wool thermal insulation, which is sheathed with facade panels that reduce the heat loss of the building [3].

It is the development of the cast-in-place concrete frame construction technology that has allowed to use a huge variety of facade systems. After the adoption of SNiP 23-02-2003, it is possible to increase the energy efficiency of houses under construction, since the norms

¹ Electronic magazine “PRONEDRA”. URL: <https://pronedra.ru/articles>

and rules that apply to the thermal insulation of buildings are focused on saving energy.

At the same time, sanitary and hygienic standards applicable to the microclimate of the premises and optimal durability parameters of enclosing structures must be complied with. In 2009, the State Duma adopted Federal Law “On Energy Saving and Increasing Energy Efficiency”, which determines a set of measures towards savings through energy efficient commodities and services.

In addition to the variety of gypsum cardboard materials, there are also several ways of attaching cladding elements to facades [4]. The analysis of the informa-

tion allowed to classify the variety of ventilated facades shown in Fig. 1.

A suitable frame structure must be selected for each cladding material. A frame structure may be made of galvanized steel, stainless steel and aluminum [5]. A less expensive fireproof galvanized steel subsystem is used for porcelain stoneware, fiber cement, composites and natural stone. Most expensive and durable stainless steel subsystems are used for buildings that are more than 50 meters high.

Aluminum systems are recommended for application in the course of renovation of old houses, since

Fig. 1. Methods of ventilated facade finishing

they are the lightest version of a frame system, although they have a weakness, that is, their low melting temperature. This system is not used in all regions due to the violation of fire regulations. If a system entails the use of brick or concrete, the fixing is made directly in the wall².

The system can be installed only in the floor overlap if porous materials, including expanded clay concrete blocks or aerated blocks, are used. External cladding protects the wall from environmental loads, such as precipitation and mechanical loading, while moisture, accumulated inside building structures and rooms is removed again.

This vapour barrier effect reliably protects from condensation, steam, moisture and ensures a pleasant microclimate in the house. Thanks to insulation placed under the cladding, heat losses are reduced by 2–3 times, and the service life of a wall is increased due to shorter freezing cycles.

The second method is a “wet” one that entails the use of a gypsum solution. It is most widely used to insulate and reconstruct old buildings, as it allows to restore the original appearance with the help of a layer of plaster, but it is also often used in new buildings due to its cheaper installation. Same as a frame facade, this type of insulation allows the vapour to leave the house easily, so that it can “breathe” and moisture does not accumulate inside [6].

²Energy saving technologies in Russia and abroad. Complex of urban planning policy and construction of the city of Moscow. URL: https://stroimsk.ru/builder_science/energoberegauschie-tehnologii-v-rossii-i-za-rubezhom

Plastered facades do not need an additional frame, and thermal insulation materials are applied directly to the wall in rolls or sheets. The insulation material is rolled over the surface, or elements are cut out of the insulated material and attached to the wall using special dowels to prevent the material from sagging. Thermal insulation boards are attached to the wall by special fasteners having round heads.

Sometimes both types of insulation can be glued to the wall by a special setting glue. After fixing the insulation, the surface is sealed and the final protective layer made of various materials is applied. Having analyzed all “wet” facades, the co-authors drafted their classification shown in Fig. 2.

A “wet” facade is more simply called a plaster facade or a “cake”, since it is a construction of layers applied gradually one after another: first comes thermal insulation followed by glue and plastic dowels; a reinforcing fiberglass mesh is fixed with a glue solution, and then the main layer of plaster, primers and paints follow.

The main advantages of plaster facades include low weight, that prevents any additional load on the foundation; simple installation, and, as mentioned earlier, the cheapest installation process and the system itself. The adherence to the wall and the adhesion of other layers of the “pie” to each other significantly reduce the number of cold bridges; therefore, higher energy efficiency values are achieved. The advantage of thermal insulation boards made of mineral wool in comparison with roll insulation is that surface leveling under the plaster layer is practically reduced to a minimum [7].

Unlike ventilated and plaster facades, in case that they bear no load and are not structural elements, there

Fig. 2. Classification of wet methods of facade finishing

is a system that primarily performs heat-protective functions, and also becomes part of the building frame. Building walls made of light steel thin-walled structures are a frame panel with a mineral wool filling and double-sided cladding. The frame of these walls consists of rack-mount C-shaped thermal profiles spaced at intervals of 600 mm, set into U-channels. Spatial frames ensure the strength, rigidity and stability of a frame system. The rigidity of low-rise buildings is ensured by transverse frames, or trusses, and vertical metal stiffeners, having a cruciform or portal shape, ensure stability in the longitudinal direction.

Since the structural frame system dominates industrial construction, the key role is assigned to enclosing structures.

A light steel thin-walled structure is a frame made of thin steel 3–4 mm thick. This methodology emerged and has been developing in the countries of Europe and the USA, but in Russia it has not yet strengthened its position due to the lack of awareness. But over the last difficult year, when a vital task arose to build a large number of hospitals and military hospitals in a short period of time at minimal costs, this methodology became one of the best dominant options.

For the first time, the term light steel thin-walled structures (LSTS) was used in Canada in the 50s, when the government was developing a plan for the construction of a large number of low-rise buildings, and following the experimental construction of several dozens of building the method proved its advantages over classical construction techniques. LSTS design gained wide recognition as the methodology used in the construction of low-rise residential buildings, warehouses, parking lots, shopping centers, hospitals, schools, etc. This popularity is explained by several positive aspects: buildings erected using LSTS are known for geometric accuracy, ease of construction and lack of shrinkage.

Let's consider the principal designs of LSTS enclosing structures [8]. The structure has the following principal components: the external wall, whose thickness is determined by the section of the profile and calculated on the basis of the heating requirements and the required thickness of the insulation layer. Profile spacing was originally set at 600 mm, this is the standard width of the majority of thermal insulation boards, and if it is necessary to increase the load-bearing capacity of the frame with heavy loads on the external walls, LSTS profile spacing can be reduced to 400 mm. The maximum spacing of frame racks, the spacing and lengths of beams, sections of elements, acceptable heights of structures, as well as the constructions of joints are determined by calculation. In most cases, a water- and windproof layer made of special roll materials is mounted on the outside under the cladding; on the inside, directly under the cladding, a vapour barrier layer is mounted to protect the heat-insulating material from saturation with water vapour coming from the room [9]. Installation of external walls is carried out

using enlarged wall panels; walls can be mounted either directly on the racks of the load-bearing frame without an air gap, or through horizontal and vertical battens, if the construction has an air gap. The minimum thickness of the insulating layer is determined by the required resistance to heat transfer depending on the average temperature, the region of construction, and characteristics of the heating period [10], and it also depends on the thermal conductivity of materials of inner and external cladding.

As for the floor, in order to avoid the effect of unsteadiness in terms of large spans between the beams, lintels are installed in a checkerboard pattern, the floor panel is fastened to the wall panel by a sealant layer, and the floor panel has a layer of waterproofing over the foundation, for example, two layers of Ruberoid³. The requirements for ceilings and their design features practically do not differ from the floor structure, although in the absence of external atmospheric influences, the vapour barrier layer can be mounted both from the outside and from the inside of the frame. The calculation of the roof frame is carried out taking into account stability and flexibility.

RESULTS OF THE STUDY

Let's consider positive aspects of LSTS wall structures.

1. The LSTS frame technology was a revolutionary technology in terms of architectural and structural solutions; it opened up numerous architectural possibilities and allowed to create objects of almost any shape with the use of any facing materials. The structures are capable of covering spans up to 21 m without intermediate roof supports and up to 8 m high, they allow for the installation of communication cables and electrical equipment inside the frame walls.

2. Frame construction makes it possible to reduce construction time by 10 times compared to traditional methods. For example, in 2020, pre-fabricated hospitals were erected on a turnkey basis throughout Russia within 40–60 days. An important factor is the all-season installation, profiles are operable at an outdoor air temperature from –65 to +55 °C. The low weight of structures reduces delivery costs, up to 80 % of frame structures are assembled before delivery to the site, and large units are assembled directly on the construction site before installation, which is important in emergencies related to the relocation of people, while profiles are supplied in transportable packages lined with timber and are compactly stored in warehouses in no more than three tiers.

3. Easy assembly, small-size components and lack of any need for lifting machines and heavy cargo ve-

³An energy-saving house: compliance with the energy balance, design, construction principles. URL: https://m-strana.ru/articles/energoberegayushchiy-dom/?utm_source=copy&utm_medium=direct&utm_campaign=copy_from_site

hicles make it possible to successfully implement construction projects in densely built-up urban areas and hard-to-reach places, for example, in the mountains. The lack of heavy machinery on construction sites reduces interference with the surrounding landscape to a minimum [11].

4. LSTS profiles have high strength. Given the average steel density of 7.85 g/cm, the weight of 1 m² of a bearing profile is about 30–45 kg, the weight of 1 m² of the finished building is 150 kg on average. The low weight of a structure and small foundation load reduce foundation costs or use expand the possibilities of construction on unstable soils, as well as the reconstruction of old buildings, accompanied by building up new stories. Shrinkage and settlement of buildings do not delay the construction process, and one can immediately proceed to the interior and exterior finishing.

5. Advanced software and latest methodologies are used to design LSTS structures. Hence, profiles are manufactured with an accuracy of 1 mm in the longitudinal direction and an accuracy of hundredths of a millimeter in the cross-section, which greatly simplifies the internal and external finishing of a building and allows not to perform the preliminary leveling of a frame or adjust the construction and its materials.

6. The strong structure of the frame, that employs the hinge principle, is capable of withstanding severe dynamic loads, which makes it applicable in excessive seismicity areas full of seismic hazards.

7. Building durability requirements are set individually for each project with regard for its characteristics. However, durability is mainly supported by galvanized steel, rust proofing and corrosive effects of a gaseous environment pursuant to SNiP 2.03.11 for load-bearing and enclosing structures made of galvanized steel. The service life of an LSTS frame is 50 to 80 years and more and is not subject to biological influence, since it is resistant to fungi, insects and rodents [12].

8. Fire safety rules, including supplementary fire safety requirements, established in SNiP⁴ for various purpose buildings, are applied to LSTS structures in the process of their design. Frameworks, made of LSTS having standard fine finishing without the use of flammable materials, successfully pass fire tests and belong to structures of the 2nd degree of fire resistance with a fire resistance rating of R 45/E 15 and fire hazard class K0 (45). In areas featuring the highest risk of ignition, such as boiler rooms, kitchens, supplementary protection can be applied in the form of another layer of fire-resistant boards. In addition, construction features of LSTS meet high explosion safety requirements, and, therefore, they are widely used for the construction of boiler houses, compressor stations, gasoline stations and other special-purpose buildings.

⁴ Technical regulations on fire safety requirements : Federal Law of 22.07.2008 No. 123-FZ (last edition).

9. If LSTS is compared with any other construction technology from the standpoint of energy efficiency, its heat loss is lowest, since the use of thermal profiles, thermal insulation, vapour barrier and windproof membranes in the walls and ceilings convert enclosing structures into a kind of an insulated flask, which, when closed, can store heat for up to 2–3 days without additional heating, and in the hot season, it can significantly reduce the need for air conditioning [13].

10. LSTS design can be safely called environmentally friendly, since the frame is recyclable, as well as mineral wool boards inside the frame that can be recycled into new products. Since profiles and all components are delivered to the construction site in the amounts accurately calculated for a particular project, there is practically no construction waste left, which can affect environmental friendliness⁵.

11. The majority of modern weather-resistant materials can be used as the outer sheathing of an LSTS wall frame, including siding, corrugated board, sandwich panels, fiber cement panels, etc. Inside the frame, mineral or basalt wool is used as insulation, which is considered antiallergic, same as the framework steel.

12. Reduction in the total cost of construction, energy savings during the building operation make LSTS construction technology the most economical among the existing ones.

Having analyzed the LSTS design and its features, we need to mention its weaknesses, although there are not so many of them, and most of them can be corrected by revising the design with the help of the re-analysis of material properties:

1. Thin steel 3–4 mm, which makes the structure less durable, is a matter of concern of many architects and designers. However, the finished structure has a rather strong and rigid frame that can withstand heavy loads.

2. An insufficient service life of 50–120 years can be called average, but it cannot be compared with the service life of concrete and brick buildings [14]. However, this method, which is the fastest one, fulfills the task of construction in a short time.

3. Weaknesses of this design are associated with the issues of building physics, including acoustics and heat engineering [13]. The presence of “cold bridges” based on the results of a thermal imaging survey requires adjusting existing standard solutions. It also entails the need to break them down by climatic zones, as well as the need for a comprehensive study of its principal features, a better quality design of LSTS structures and the quality of construction and installation works.

4. A large number of poor quality counterfeit steel profiles can cause disastrous consequences during the operation of frame buildings. Therefore, the choice of LSTS materials and developers should be made

⁵ Environmental issues of energy saving. URL: <https://helpiks.org/4-72264.html>

thoroughly, any cooperation must entail the work with manufacturers and builders who are holders of appropriate licenses and permits.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Identification of thermal characteristics of buildings and structures is always a complex engineering task, and it takes many days of work performed by several specialists. Principal documents governing thermo-technical calculations of ventilated facades are Construction Regulations 50.13330.2012 and 23-101-2004, as well as “Recommendations for the design of hinged facade systems with a ventilated air gap for new construction projects and reconstruction of buildings” [15] and numerous similar recommendations. Now there are many special-purpose software programmes that simplify these calculations, and the final result is obtained almost instantly, including visual infographics, and many other programmes such as CalculiX, Elmer, Salome designated for calculating temperature fields of a ventilated façade. They are available in public domain. To demonstrate the advantages of the above facade systems, we will use a simplified calculation performed by an online calculator, which will not only identify the thermal insulation material and its quantity to be used, but it also will assess the economic benefit from the use of a particular system [16]. For example, let's take the following parameters: a two-story house in the Moscow region having dimensions of 5 m by 7 m, the floor height of 2.4 m and the maximum ridge height of 6.5 m; the house is made of ceramic bricks; it has an unheated basement, an uninsulated attic and a cold roof. We enter the data into the calculator, and specify the need to make a ventilated facade, insulate the basement, roof and attic.

We also enter the information that the house is heated using a gas boiler and the desirable indoor temperature is 23 °C; the cost of energy is 6 rubles/m³ for calculation purposes. The software instantly analyzes the data that we enter and shows the type and amount of material needed to insulate the whole house. Besides, one can see that the heat loss through the load-bearing walls will be reduced by 89 %, through the floors by 91 %, and through the floor by 92 % [17]. Gas cost will be reduced by 1,302 rubles per month, and accordingly, annual savings will reach 15,629 rubles. The calculator uses the cost of material supplied by a certain manufacturer at its base price; in this case the material pay-back period reaches 59 months [18].

Having changed the input data to the facade insulation plaster, while the basement and roof data remain the same, the calculator provides information that heat losses are reduced by almost the same values, but the cost of material will be paid back in 49 months. Hence, this system is not less efficient, but much cheaper than a ventilated facade.

When information about the frame system of the facade with additional insulation is entered, heat losses through the walls are reduced by 93 %, and the cost of material will be paid back in 26 months, which shows the highest thermal efficiency of the LSTS system with additional insulation [19].

Surely, this calculator is a marketing instrument, and it is aimed at marketing products among potential purchasers; it is a good example of how building maintenance savings can be demonstrated in a simple and clear way [20], and most importantly, how the living environment can be made comfortable and free from cold walls or drafts⁶.

Heat-shielding properties of LSTS enclosure structures are identified with the help of the following two values:

- R_o is resistance to heat transfer, it determines the resistance of the enclosure to heat transfer, calculated for winter conditions;
- D is thermal stability, it characterizes the resistance of the enclosure to transmission of periodic thermal effects, calculated for summer conditions.

R_o must be equal to or greater than the minimum value required by the sanitary and hygienic standards, and the required resistance R_{otr} to heat transfer:

$$R_o \geq R_{otr}. \quad (1)$$

The complexity of the calculation, made for LSTS, is caused by a large difference in the values of calculated coefficients of steel (58 W/m°C) and mineral wool insulation (0.03–0.1 W/m°C); therefore, the thermal technical calculation is performed using the following data:

- calculation of temperature fields;
- reduced thermal resistance;
- results of experimental studies.

The required resistance to heat transfer R_{otr} is identified by the formula:

$$R_{otr} = \frac{(t_{int} - t_{ext})^n}{\Delta t^s \alpha_{in}}, \quad (2)$$

where n is the coefficient whose value depends on the position of the outer surface of enclosing structures in relation to the outside air, according to table, provided in SNiP 23-02-2003; t_{int} is the design temperature of the indoor air, taken in accordance with GOST 12.1.005-88, °C; t_{ext} is the design temperature of the outdoor air, equal to the average temperature of the coldest five-day period with a 0.92 reliability according to SNiP 2.01.01-82, °C; Δt^s is the standard difference between indoor air temperature and the temperature of the inner surface of the enclosing structure, taken according to SNiP 23-02-2003, °C; α_{in} is the heat

⁶A calculator for identifying the cost of insulation and heating savings. URL: https://www.isover.ru/calculator-online?utm_medium

transfer coefficient of the inner surface of enclosing structures according to SNiP 23-02-2003.

In this formula, $\Delta t^s \alpha_{in}$ can be replaced by an equal heat flow through the enclosure:

$$q^n = \Delta t^s \alpha_{in} \quad (3)$$

and present R_{otr} as:

$$R_{otr} = \frac{(t_{int} - t_{ext})^n}{q^n}. \quad (4)$$

We find the value for the city of St. Petersburg according to SNiP 23-02-2003, and then the required resistance to heat transfer is:

$$R_{otr} = \frac{(20 - (-26)) \cdot 1}{52,3} = 0,88 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}.$$

The degree-day of the heating period is determined by the formula:

$$D_d = (t_{int} - t_{ht}) z_{ht}, \quad (5)$$

where t_{ht} is the average temperature of -1.8°C , and the duration of 220 days of the period with the average daily air temperature below or equal to 8°C ;

$$D_d = (20 - (-1,8)) \cdot 220 = 479.$$

According to SNiP 23-02-2003, the required resistance to heat transfer

$$R_{otr} = 3,08 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/BT}.$$

Heat transfer resistance R_o , $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$, of the enclosing structure can be calculated by the formula:

$$R_o = \frac{1}{\alpha_{in}} + R_k + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (6)$$

where α_{in} is the heat transfer coefficient of the inner surface of enclosing structures according to SNiP 23-02-2003; α is the heat transfer coefficient (for winter conditions) of the outer surface of the enclosing structure $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; R_k is the thermal resistance of the enclosing structure, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$.

Thermal resistance is determined by the formula:

$$R_k = \delta / \lambda, \quad (7)$$

where δ is the layer thickness, m ; λ is the calculated coefficient of thermal conductivity of the layer material, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

The thermal resistance of the enclosing structure, having successive homogeneous layers, is calculated as the sum of thermal resistances of individual layers:

$$R_k = R_1 + R_2 + R_{a.g}, \quad (8)$$

where R_1 , R_2 are thermal resistances of individual layers of an enclosing structure, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$; $R_{a.g}$ is the thermal resistance of an insulated air gap, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$.

For LSTS, if the structure consists of heterogeneous layers of materials (thermal insulation, profiles, rods, bolts, etc.), it is conventionally dismembered and presented in the form of a chain of thermal resistances, and reduced thermal resistance $P\tau$ $^\circ\text{C/W}$ is calculated.

Moreover, areas with parallel branches of the network with thermal resistances P^I and P^{II} are calculated by the formula:

$$P_1 = \frac{(P^I P^{II})}{(P^I + P^{II})}. \quad (9)$$

Areas with consecutive thermal resistances are calculated by summing up their thermal resistances.

Reduced thermal resistance R_k , $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$, is identified by the formula:

$$R_k = P^v A, \quad (10)$$

where A is the total area of the structure, equal to the sum of individual areas, m^2 .

The reduced resistance to heat transfer of a heterogeneous structure or its fragment can be identified as follows:

$$R_o = \frac{n(t_{int} - t_{ext}) A}{Q}, \quad (11)$$

where A is the area of a heterogeneous enclosing structure or its fragment, m^2 ; Q is the total heat flow through the structure or its fragment with area A , W , identified with the help of the temperature field calculated using a computer or experimentally pursuant to GOST 26254 or GOST 26602.1 from the indoor side; n is the coefficient taken depending on the position of the outer surface of enclosing structures in relation to the outdoor air, taken according to SNiP 23-02, with regard for the note; t_{int} is the design temperature of the indoor air, $^\circ\text{C}$; t_{ext} is the design temperature of the outdoor air, $^\circ\text{C}$.

Reduced resistance to heat transfer:

$$R_o = \frac{A}{\sum \left(\frac{A}{R_{o,i}} \right)}, \quad (12)$$

where A is the area of the i -th section, m^2 ; $R_{o,i}$ is the reduced transmission resistance, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$; A is the total area of the structure, equal to the sum of individual areas, m^2 ; m is the number of areas of the enclosing structure, having different reduced heat transfer resistances.

Now the task is to apply the number of areas to the formula of the area, and we will obtain the required value of the structure's real resistance to heat transfer⁷.

Further, by comparing the calculated value with the standard value, one can find out whether the enclosing structure meets the sanitary and hygienic standards for thermal protection and whether the condition for the thermal protection of the enclosing structure is fulfilled. For each layer of the enclosing structure, the thermal inertia index is calculated by the formula:

$$D = R_s, \quad (13)$$

⁷ Methods of thermo-technical calculation of external walls of buildings having hinged facade systems "Metal Profile". Omsk, SiBADI, StroySt-Sibadi Testing Centre. URL: https://www.staltd.ru/media/metodika_rascheta_teplo tehniki_vf.pdf

where R is the thermal resistance of the layer of the enclosing structure; s is the calculated coefficient of heat assimilation by the material of a separate layer of the enclosing structure.

For a multi-layer building envelope:

$$D = D_1 + D_2 + D_n, \quad (14)$$

where D_1 , D_2 , D_n are the calculated values of the thermal inertia of individual layers of the enclosing structure.

The calculated coefficient of heat assimilation by the air gap is taken to be equal to zero. Layers of the structure, located between the air gap which is ventilated by the outdoor air, and the outer surface of the enclosing structure, are not taken into account⁸. The value of the heat assimilation coefficient of the inner surface is influenced only by the ther-

⁸ Thermal protection of buildings, a thermo-technical calculator. URL: https://raschetsten.ru/teplotekhnicheskij-raschet/?utm_source

mal properties of the enclosure materials located in the layer of strong vibrations, for which D is equal to 1.

Given the foregoing, the following conclusions can be made:

- identification of thermo-technical characteristics of buildings and structures is always a difficult engineering task;
- when ventilated façade systems, plaster façades and LSTS systems are used, heat losses through load-bearing walls can be reduced by almost 90 %, heat losses through ceilings and floors can be reduced by almost 93 %, and energy costs are significantly reduced, which allows to recover the cost of the material and insulation system installation in a few years [20];
- LSTS systems are most cost-effective for construction purposes;

The thermal resistance of an LSTS enclosing structure, having successive homogeneous layers, is calculated as the sum of thermal resistances of individual layers.

REFERENCES

1. Beregovoy A.M. *Buildings with energy-saving structures : Ph. D. in Technical Sciences*. Penza, PGUAI, 2005; 344. (rus.).
2. Tabunshchikov Y.A. Passive multi-storey buildings. *Buildings of High Technology*. 2013; 2(2):12-21. (rus.).
3. Klimenko A.V., Gasho E.G. Problems of improving the efficiency of community thermal engineering based on the example of buildings in the housing and communal services of Moscow's central district. *Teploenergetika*. 2004; 6:54-59. (rus.).
4. Bashmakov I.A. Improvement of energy efficiency in Russian industry. *Center for Efficient Use of Energy (CENEF)*. Moscow, 2013; 35. (rus.).
5. Bezborodov E.L. Exterior walls with a frame of light steel thin-walled structures (LSTC). *Innovation and Investment*. 2018; 2:186-190. (rus.).
6. Resin V.I. Effective methods of energy conservation management in construction. *Architecture and Construction of Moscow*. 2003; 508-509(2-3):7-13. (rus.).
7. Elokhov A.E. Energy-passive house-building in Russia. *Stroyprofil*. 2013; 2(105). (rus.).
8. Podolyan L.A. *Energy efficiency of new generation residential buildings : Ph. D. candidate of technical sciences*. Moscow, Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2005; 156. (rus.).
9. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M. *Mathematical Modelling and Optimization of Thermal Efficiency of Buildings*. Moscow, AVOK-PRESS, 2015; 169. (rus.).
10. Klimova G.N., Litvak V.V. *Seven problems and seven keys of energy saving : a monograph*. Tomsk, Krasnoye Znamya, 2013; 146. (rus.).
11. Khomutov A.F. *Thermal insulation properties of complex-type external enclosures using monopanels : dissertation. ... Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 1981; 133. (rus.).
12. Vasiliev G.P. Results of the field studies of the thermal regime of an experimental energy-efficient house (in Russian). *XXI century Building materials, equipment and technologies*. 2002; 6:3-5. (rus.).
13. Ivanov G.S., Spiridonov A.V., Khromets D.Yu., Morozov A.M. Energy saving during restoration and overhaul of buildings. *Housing Construction*. 2002; 1:7-9. (rus.).
14. Makarov E.V., Rumyantsev V.V., Shkulev S.P. Full-scale inspection of external building enclosure constructions with the use of thermal imager. *Investigations on Thermal Problems of the North: Collection of Papers*. 1999; 52-55. (rus.).
15. Guryev V.V., Khainer S.P., Dmitriev A.N. et al. Influence of Some Parameters of porous-fiber Heat Insulators on Efficiency of Heat Protection of Buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 1998; 5:53-55. (rus.).
16. Tsvetkov O.V. Systems of external heat insulation with a protective-decorative layer on the heater. *Building materials, equipment, technologies of the XXI century*. 1999; 5:32-33. (rus.).
17. Kulachkov V.N. Complex approach to energy saving in construction. *Construction Materials*. 2000; 8:14-15. (rus.).

18. Devyataeva G.V. *Technology of reconstruction and modernization of buildings*. Moscow, INFRA-M, 2003; 15-18. (rus.).
19. Zhoga E.O., Nam V.V., Chubarkina I.Yu. Analysis of “smart” technologies in the sphere of housing and communal services. *Proceedings of the IX All-Russian scientific-practical conference*. Moscow, MISI-MGSU, 2018; 50-55. (rus.).
20. Grigorenko K.A., Petreneva O.V. Energy-saving technologies in the reconstruction of houses of mass series. *Science, Education and Culture*. 2017; 2(5):(20):64-66. (rus.).

Received August 3, 2021.

Adopted in revised form on September 24, 2021.

Approved for publication on September 24, 2021.

B I O N O T E S: **Viktor Yu. Sergeev** — Colonel of the Internal Service, Deputy Head of the Department for Supervision and Preventive Work, Deputy Chief State Inspector of the Moscow Region for Fire Supervision; **Main Department of the Ministry of Emergency Situations of Russia in Moscow Region**; 34 Novokurkinskoe highway, Moscow region, Khimki, 141501, Russian Federation; vs720@mail.ru.