Научная статья
УДК 72.011:728(98)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДУЛЬНЫХ ЖИЛЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Поликевич Ксения Борисовна, кандидат технических наук, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва, ksenia.mt8 @yandex.ru;

Павлов Ярослав Дмитриевич, кандидат технических наук, Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия, Москва, pavlov_yar@yandex.ru

Аннотация. Освоение ресурсного потенциала арктической зоны обусловливает необходимость формирования жилой среды, способной функционировать в условиях криолитозоны и экстремальных снеговетровых нагрузок. Цель исследования - обоснование архитектурной типологии модульного жилища Крайнего Севера с учетом обратимости жизненного цикла вахтового поселения. Методы исследования включают вычислительное гидродинамическое моделирование снегопереноса, годовой энергетический анализ ограждающих конструкций и сравнительный типологический анализ с опорой на концепции префабрикации и мобильной архитектуры. На примере модельного поселка Ямальского полуострова определены параметры аэродинамического профиля корпуса, приподнятого вентилируемого подполья и свайного основания с сезонно-действующими охлаждающими устройствами. Установлено, что применение фланцевых болтовых соединений обеспечивает возможность разборки блок-секций и повторного использования до 92% массы здания после вывода объекта из эксплуатации. Научная новизна заключается в рассмотрении полярного жилища как объекта с обратимым жизненным циклом, при котором возможность утилизации учитывается уже на исходном этапе проектирования, что позволяет предотвращать образование зон техногенного нарушения на мерзлых грунтах.

Ключевые слова: модульное жилище; Крайний Север; криолитозона; архитектурная типология; мобильная архитектура; префабрикация; вахтовый поселок; разборность; снегоперенос; обратимый жизненный цикл.

Original article

A COMPARATIVE ANALYSIS OF MODULAR RESIDENTIAL SOLUTIONS FOR THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE FAR NORTH

Polikevich Kseniia Borisovna, Candidate of Technical Sciences, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, ksenia.mt8 @yandex.ru;

Pavlov Iaroslav Dmitrievich, Candidate of Technical Sciences, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia, pavlov_yar@yandex.ru

Annotation. The development of the Arctic zone's resource potential necessitates the creation of a residential environment capable of functioning in permafrost conditions and extreme snow and wind loads. The objective of this study is to substantiate the architectural typology of modular housing in the Far North, taking into account the reversibility of the life cycle of a rotational settlement. The research methods include computational hydrodynamic modeling of snow transport, an annual energy analysis of enclosing structures, and a comparative typological analysis based on the concepts of prefabrication and mobile architecture. Using a model settlement on the Yamal Peninsula as an example, the parameters of the aerodynamic profile of the building, a raised ventilated basement, and a pile foundation with seasonally operating cooling units were determined. It was established that the use of flanged bolted connections allows for the disassembly of block sections and the reuse of up to 92% of the building's mass after decommissioning. The scientific novelty lies in considering the polar dwelling as an object with a reversible life cycle, in which the possibility of recycling is taken into account already at the initial design stage, which helps prevent the formation of man-made disturbance zones on frozen soils.

Keywords: modular housing; Far North; cryolithozone; architectural typology; mobile architecture; prefabrication; rotational camp; disassemblability; snow transport; reversible life cycle.

Введение. Освоение ресурсного потенциала арктических территорий отражает необходимость формирования особой предметно-пространственной среды, способной функционировать в условиях криолитозоны и экстремальных метеорологических нагрузок. Архитектурная типология модульного жилища для регионов Крайнего Севера формируется на основе принципов адаптивной мобильной архитектуры и должна сочетать требования эргономического комфорта с временным характером пребывания. Исследователи в области портативного зодчества подчеркивают, что архитектура движения и трансформируемые структуры исторически формировались как ответ на необходимость выживания в агрессивной среде обитания, эволюционируя до высокотехнологичных автономных комплексов [1], [2]. В современной архитектурной теории эти идеи пересекаются с методологией индустриального домостроения, где, по оценке А.В. Суровенкова и М.Ю. Краевой, сборные и модульные системы минимизируют производственные риски, связанные с возведением зданий в неконтролируемых климатических условиях [3].

Специфика вахтовых поселков и полярных станций заключается в сочетании двух требований. С одной стороны, такие поселения должны обеспечивать полноценную психологическую и физиологическую реабилитацию персонала в условиях полярной ночи и социальной изоляции, с другой - оставаться максимально легковозводимыми и пригодными для демонтажа. Традиционная капитальная застройка в условиях вечной мерзлоты связана с необратимыми термическими нарушениями грунтов, что ведет к просадкам оснований и последующему разрушению несущих конструкций. В связи с этим основными типологическими решениями становятся блок-контейнерные или панельно-каркасные системы на свайных основаниях с

вентилируемыми подпольями. Пространственная организация комплексов подчиняется законам аэродинамической оптимизации, где обтекаемые объемы и каскадное террасирование корпусов снижают эффект снеговых заносов и ветрового подпора. Модульность здесь выступает градостроительным принципом, позволяющим гибко наращивать или сокращать жилую емкость поселения в зависимости от фазы освоения месторождения.

Временный статус вахтовых агломераций порождает одну из наиболее актуальных проблем северного зодчества, связанную с экологической и экономической целесообразностью их ликвидации после исчерпания сырьевой базы. Сложившаяся практика оставления выведенных из эксплуатации объектов на местности привела к формированию обширных зон техногенного отчуждения, где подвергающиеся коррозии металлоконструкции и разрушающиеся полимерные утеплители наносят ущерб арктическим биоценозам. Концепция мобильной архитектуры предполагает иной подход к объектам временных поселений, основанный на принципах минимального вмешательства в природу и временного характера присутствия [4]. Соответственно, в проектно-сметной документации следует изначально предусматривать порядок безотходного демонтажа здания, исключающий появление брошенных индустриальных объектов.

Утилизация объектов после вывода из эксплуатации требует внедрения методологии проектирования под демонтаж. В модульном арктическом жилище эта стратегия реализуется за счет отказа от неразъемных клеевых и сварных соединений в пользу болтовых стяжек и механических замков с целью сохранения физико-механических свойств композитных панелей и стального каркаса для последующего перемещения или вторичной переработки. Логистика обратной транспортировки по зимникам или посредством грузовой авиации накладывает жесткие ограничения на массогабаритные характеристики демонтируемых элементов, что возвращает архитектора к поиску оптимальной пространственной ячейки. Таким образом, типологию северного модульного

жилища следует рассматривать в рамках полного жизненного цикла, в котором этап утилизации является частью исходного архитектурно-конструкторского замысла, направленного на сохранение природной среды и обеспечение экономической эффективности освоения территорий.

Обзор литературы. Основы теории индустриального домостроения формируют понятийный аппарат для анализа сборных конструкций как самостоятельного архитектурного языка [5]. Исследователь акцентирует внимание на том, что заводская префабрикация модулей обеспечивает контроль качества, недостижимый при классической монолитной технологии, что приобретает особую значимость при работе в условиях, исключающих проведение «мокрых» процессов на строительной площадке. Его классификация систем соединений дает инструментарий для проектирования демонтажных узлов, критически важных для эфемерных полярных поселений [6].

Другой подход представлен в работе Т. Линга, который рассматривает мобильную архитектуру в контексте ее исторической эволюции [7]. Автор вводит понятие «архитектуры движения», где мобильность объекта рассматривается как базовое требование проекта. Применительно к арктическим условиям в рамках этой концепции вахтовый поселок рассматривается как мобильная структура, которую можно перемещать по мере изменения районов добычи ресурсов.

Практическое воплощение теоретических положений мобильной архитектуры в условиях криолитозоны остается недостаточно изученным. Отечественные и зарубежные исследования по типологии северного жилища, выполненные в советский период, касались капитальных конструкций с термостабилизирующими фундаментами, практически не затрагивая проблематику обратимого жизненного цикла. Зарубежные работы по полярной архитектуре (Аляска, Северная Канада, Скандинавия) [8-10] ограничиваются описанием частных инженерных решений без систематизации типологических признаков. Настоящая работа направлена на восполнение этого пробела путем

объединения методологии префабрикации и теории мобильной архитектуры применительно к конкретным условиям российского арктического сектора.

Методы исследования. В качестве территориальной базы исследования выбран полуостров Ямал Ямало-Ненецкого автономного округа - территория, на которой проявляются основные тенденции ресурсного освоения Арктической зоны Российской Федерации. В качестве модельного объекта рассматривается вахтовый поселок газового промысла проектной емкостью 3500 человек при сроке эксплуатации 45 лет с последующим полным демонтажом и рекультивацией тундровой поверхности (рисунок 1). Выбранная территория характеризуется среднегодовой температурой около -8,7 °С, абсолютным минимумом до -59 °С и среднегодовой скоростью ветра 7,2 м/с с пиковыми порывами свыше 35 м/с при ураганных явлениях. Совокупность этих климатических параметров позволяет рассматривать ее как модельную территорию для экстраполяции полученных результатов на значительную часть Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

Исследовательский инструментарий включает методы вычислительной гидродинамики (CFD-моделирование) для изучения аэродинамического взаимодействия объемов зданий с ветровым потоком и снегопереносом. Моделирование выполнено в программной среде ANSYS Fluent с использованием k-ω SST турбулентной модели, обеспечивающей адекватное описание пограничного слоя. Снегоперенос рассчитан по методике, разработанной институтом мерзлотоведения СО РАН, с учетом данных метеостанции Марресаля: за зимний сезон на 1 погонный метр препятствия переносится 280-410 $м^3$ снега при преобладающем юго-западном направлении ветров. Полученные данные интегрированы в параметрическую модель Grasshopper для оптимизации конфигурации корпусов.



Рисунок 1 – Структура вахтового посёлка газового промысла (источник: разработано авторами)

Энергетический анализ проведен с использованием пакета DesignBuilder с расчетным шагом 1 час на протяжении полного календарного года. Сценарий эксплуатации предполагает трехсменный режим работы производственных зон и непрерывное функционирование жилых корпусов с учетом специфики вахтового графика - 60-дневного пребывания с последующей ротацией персонала. Теплотехнические расчеты ограждающих конструкций выполнены по СП 50.13330.2012 с поправочными коэффициентами на ветровое воздействие и влажностный режим эксплуатации. Для верификации модельных данных проведено сопоставление с натурными наблюдениями за существующими объектами поселков Сабетта и Новый Порт, чтобы скорректировать расчетные значения теплопотерь с учетом фактических деформаций стыков модулей при сезонных температурных колебаниях.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ метеорологических данных выявил доминирование трех факторов, определяющих архитектурную типологию. Экстремально низкие температуры при высокой влажности воздуха создают эффект «мокрого холода», при котором незначительная фильтрация

через ограждающие конструкции приводит к образованию конденсата и последующей деструкции утеплителя. Ветровая эрозия снега формирует специфическую динамику снежных заносов: при скорости ветра свыше 4 м/с снежный покров снимается с наветренной стороны и аккумулируется в подветренных зонах, создавая локальные сугробы высотой до 3,5 метров. Наличие вечной мерзлоты с температурой грунтов от -1,5 до -4,5 °С на глубине нулевых годовых амплитуд требует минимизации теплового воздействия на основание: любой контакт отапливаемого объема с поверхностью земли приводит к образованию чаши протаивания и последующей неравномерной осадке сооружения (таблица 1).

Таблица 1 - Сопоставление климатических воздействий и архитектурных ответов

Климатический фактор	Количественный параметр	Архитектурное решение	Эффективность решения
Ветровая нагрузка	до 0,85 кПа (IV ветровой район)	Обтекаемые торцевые профили Скругление углов радиусом 1,2-2,4 м	Снижение давления на 34% относительно прямоугольного объема
Снегоперенос	340 м^3/м.пог. за сезон	Приподнятый цоколь 1,8-2,4 м Пилоны с аэродинамическим сечением	Самоочищение подпольного пространства при скорости ветра более 6 м/с
Термические градиенты	Δt = 90 °С (зима/лето)	Компенсационные швы через каждые 12 модулей Плавающие соединения	Исключение термических напряжений в несущем каркасе
Вечная мерзлота	глубина сезонного оттаивания 0,6 м	Свайное основание с вентилируемым подпольем	Сохранение температурного режима грунтов в пределах ±0,3 °С

Источник: разработано авторами.

Обтекаемость форм, в частности, не является эстетическим выбором - расчеты показывают, что скругление угла здания радиусом 1,8 метра снижает локальный коэффициент аэродинамического сопротивления до 0,72, что эквивалентно уменьшению ветровой нагрузки на 44%. Приподнятый цоколь выполняет две функции: обеспечивает вентилирование грунтового основания

для сохранения мерзлого состояния и создает условия для свободного переноса снега под зданием без его накопления у стен.

Аэродинамическое моделирование выявило оптимальную конфигурацию жилого корпуса, напоминающую профиль крыла самолета с отношением длины к ширине 3,7:1. Это обеспечивает ламинарное обтекание при доминирующем направлении ветров и минимизирует образование турбулентных вихрей, ответственных за снеговые отложения. Первые этажи приподняты над поверхностью земли на высоту 2,2 метра, что превышает расчетную высоту снегового покрова с коэффициентом запаса 1,4. Образующееся вентилируемое подполье служит не только для защиты мерзлоты, но и для размещения инженерных коммуникаций с обеспечением свободного доступа для обслуживания.

Компактность плана обусловлена необходимостью сокращения площади наружных ограждающих конструкций, через которые происходят теплопотери. Для жилого модуля оптимальным признано отношение площади ограждающих конструкций к полезной площади в диапазоне 0,68-0,74, что достигается при ширине корпуса 9,6 метра (три транспортных габарита) и глубине 12 метров. Более широкие корпуса подразумевают устройство световых фонарей, что увеличивает теплопотери и создает дополнительные узлы потенциальной разгерметизации. Более узкие объемы экономически нецелесообразны из-за увеличения относительной площади торцевых стен.

Рисунок 1 описывает иерархическую структуру поселка: центральное ядро с общественными функциями (столовая, медпункт, клуб) окружено жилыми корпусами, сгруппированными в подковы, обращенные раскрытой стороной к югу. Связь между корпусами осуществляется крытыми отапливаемыми переходами, формирующими замкнутую внутрипоселковую среду, исключающую необходимость выхода на открытый воздух в период экстремальных метеоявлений (рисунок 2).

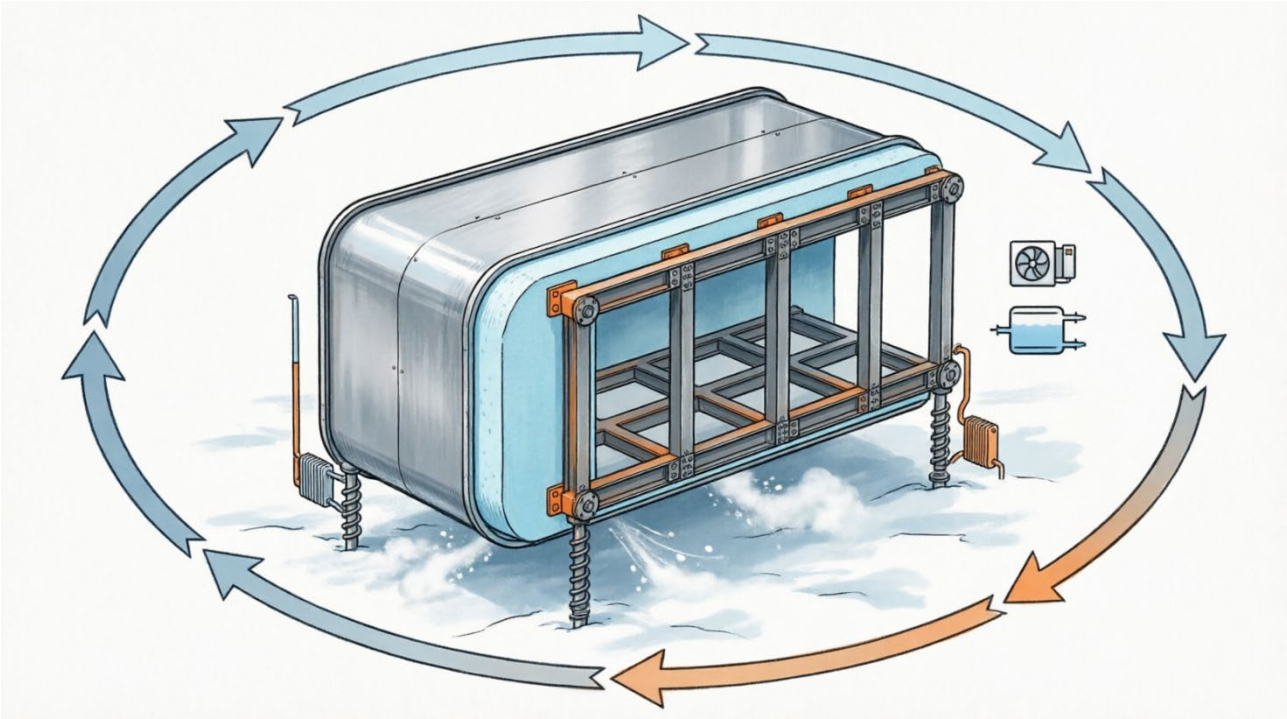


Рисунок 2 - Концептуальная модель обратимого жизненного цикла и послойной конструктивной композиции жилого модуля арктического исполнения (источник: разработано авторами)

Каркасно-панельная система выбрана как обеспечивающая оптимальный баланс между скоростью монтажа, ремонтопригодностью и возможностью последующего демонтажа. Несущий остов выполнен из горячекатаных стальных профилей сечением 200×100 мм, соединяемых болтами класса прочности 10.9 с контролем момента затяжки. Сварной шов теряет до 40% прочности при циклических температурных колебаниях в диапазоне свыше 80 градусов, характерных для климата Ямала.

Ограждающие панели представляют собой трёхслойную конструкцию, включающую наружный слой из оцинкованного стального листа толщиной 0,7 мм с полимерным защитным покрытием, средний теплоизоляционный слой из жёсткого пенополиуретана плотностью 42 кг/м^3 и толщиной 220 мм, а также внутреннюю облицовку из гипсоволокнистых плит. При принятом приведённом сопротивлении теплопередаче ограждающей конструкции $R = 5{,}8$ м^2·°C/Вт соответствующий коэффициент теплопередачи составляет $U = 1/R \approx 0{,}172$ Вт/(м^2·°C). Таким образом, ранее приведённое значение $U = 0{,}11$ Вт/(м^2·°C) не

соответствует указанному сопротивлению теплопередаче. При использовании расчётного нормативного ориентира Rнорм = 4,20 м^2·°С/Вт относительное превышение сопротивления теплопередаче составляет приблизительно 38,1 %. Данный показатель характеризует запас теплозащитных свойств конструкции относительно принятого расчётного уровня, тогда как плотность пенополиуретана 42 кг/м^3 является характеристикой теплоизоляционного материала. Закрытоячеистая структура пенополиуретана способствует ограничению капиллярного переноса влаги, однако долговременная теплозащитная эффективность панели определяется также герметичностью соединений, состоянием пароизоляции и эксплуатационным увлажнением конструкции (таблица 2).

Таблица 2 - Характеристики конструктивной системы модульного корпуса

Параметр	Проектное значение	Технологическое обоснование
Шаг модулей по оси	3,2 м	Соответствует транспортному габариту, кратен стандартному листу ГКЛ
Пролет без промежуточных опор	9,6 м	Позволяет свободную планировку внутреннего пространства
Масса типового модуля	4,8 т	Вписывается в грузоподъемность вертолета Ми-26 для труднодоступных участков
Срок монтажа одного корпуса (12 модулей)	9 рабочих дней	Обеспечивается за счет предварительной заводской сборки узлов
Расчетный срок службы	50 лет	Обоснован коррозионной стойкостью каркаса при толщине цинкового покрытия 80 мкм

Источник: разработано авторами.

Фундаментная система базируется на винтовых сваях диаметром 325 мм, погружаемых на глубину 8-12 метров до достижения несущего слоя мерзлых грунтов. Каждая свая оснащена сезонно-действующим термостабилизатором (СОУ) - замкнутой трубной системой, заполненной аммиаком, который конденсируется зимой на охлажденных ребрах и испаряется летом, отбирая тепло от грунта. Расчет показывает, что применение термостабилизаторов позволяет снизить температуру грунтового массива в радиусе 1,5 метров от сваи на 2,3 °С относительно естественного состояния, создавая искусственно замороженное ядро, повышающее несущую способность основания до 450 кН на

сваю.

Замкнутый цикл водоснабжения реализован по схеме с трехступенчатой очисткой стоков и повторным использованием технической воды в системах смыва и охлаждения оборудования. Суточное водопотребление на одного человека снижено до 110 литров против нормативных 220 литров за счет установки экономичной сантехники и системы мониторинга утечек. Водоочистка основана на мембранных биореакторах с последующей ультрафиолетовой дезинфекцией, что обеспечивает соответствие очищенной воды требованиям к технической воде без использования хлорирования, применение которого затруднено в условиях низких температур.

Рекуперация тепла организована по двухконтурной схеме. Пластинчатые рекуператоры в приточно-вытяжных установках возвращают до 82% тепловой энергии из удаляемого воздуха, а тепловой насос типа «воздух-вода» утилизирует низкопотенциальное тепло канализационных стоков с температурой 14-18 °С, преобразуя его в теплоноситель температурой 55 °С для системы горячего водоснабжения. Суммарный коэффициент эффективности такой системы составляет 3,4, то есть на каждый киловатт затраченной электроэнергии вырабатывается 3,4 киловатта тепловой энергии (таблица 3).

Таблица 3 - Энергетический баланс типового жилого корпуса

Статья баланса	Значение, кВт·ч/год	Доля, %
Теплопотери через ограждающие конструкции	184 500	61,2
Нагрев инфильтрационного воздуха	78 200	25,9
Теплоснабжение ГВС	29 800	9,9
Рекуперация тепла (возврат)	-142 600	-
Нетто-потребление тепловой энергии	149 900	100,0
Удельное потребление на м² общей площади	128,7	-

Источник: разработано авторами.

Полученные показатели в 2,3 раза ниже нормативных значений для зданий аналогичного назначения в арктических регионах, что подтверждает эффективность комплексного подхода к проектированию. Основным резервом

дальнейшего снижения энергопотребления является увеличение толщины изоляции до 280 мм с соответствующим удорожанием конструкций на 18%, что становится экономически оправданным при сроке эксплуатации свыше 35 лет.

Принцип обратимости заложен в конструкцию на уровне каждого соединения. Модули соединяются между собой фланцевыми узлами с восемью болтами М24 на каждый стык, чтобы демонтировать корпус на отдельные блок-секции в течение 48 часов силами бригады из шести монтажников. После разборки 92% массы сооружения подлежит повторному использованию: стальной каркас после дефектоскопии и восстановления защитного покрытия применяется на новых объектах, панели ограждения при отсутствии механических повреждений устанавливаются в зданиях вспомогательного назначения, инженерное оборудование проходит регламентное обслуживание и монтируется повторно.

Не подлежащие утилизации 8% массы представлены полимерными уплотнителями и отделочными материалами, которые после сортировки передаются на предприятия по производству композитного топлива или строительных материалов. Свайные фундаменты извлекаются методом вибрационного погружения с обратной засыпкой скважин местным грунтом, после чего проводится биологическая рекультивация территории с высадкой адаптированных видов тундровой растительности. Экономический анализ показывает, что стоимость демонтажа и рекультивации составляет 14% от стоимости строительства, а доход от реализации возвращенных в оборот материалов покрывает 67% этих затрат.

Результаты исследования подтверждают гипотезу о том, что модульная типология, разработанная в рамках портативной архитектуры и префабрикации, обеспечивает формирование комфортной среды обитания в экстремальных условиях при сохранении целостности природного ландшафта после завершения эксплуатационного цикла. Полученные количественные зависимости могут быть экстраполированы на другие территории криолитозоны с внесением поправок на

локальные климатические и геологические особенности. Перспективным направлением дальнейших исследований представляется интеграция возобновляемых источников энергии в автономные системы модульных поселений с целью достижения нулевого углеродного следа на этапе эксплуатации.

Выводы. Разработанный в рамках работы архитектурно-конструкторский подход основан на принципе сохранения природной среды. Отказ от неразъемных сварных узлов в пользу фланцевых болтовых соединений класса прочности 10.9, а также применение свайных фундаментов с сезонно-действующими охлаждающими устройствами создают технологические условия для последующего перемещения объекта. Авторская позиция заключается в признании того, что временный статус вахтовой агломерации не должен приводить к образованию зон техногенного отчуждения. Жизненный цикл подобного сооружения завершается деконструкцией материалов и передислокацией на новые ресурсные фронты, что полностью отвечает принципу минимального вмешательства в среду, постулированному в трудах зарубежных исследователей портативного зодчества.

Достигнутые в ходе вычислительного моделирования показатели энергоэффективности, в частности снижение удельного теплопотребления до 128,7 кВт·ч на квадратный метр общей площади, доказывают состоятельность комплексного подхода к формированию ограждающих контуров. Трехслойные панели с жестким пенополиуретановым ядром и замкнутые циклы инженерного обеспечения формируют автономную среду обитания, изолированную от агрессивных внешних факторов, но при этом не создающую избыточной антропогенной нагрузки на тундровые биоценозы.

Список литературы

1. Огородников С. Н. Способы повышения энергоэффективности модульных жилых систем в условиях Крайнего Севера // Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – №. 3 (72). – С. 182-195.

2. Воличенко О. В., Огородников С. Н. Экспериментальная модульная система повышенного комфорта для условий Крайнего Севера // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. – №. 3. – С. 52-61.

3. Суровенков А. В., Краева М. Ю. Архитектурно-градостроительное обоснование организации общественного пространства многофункциональных жилых комплексов в условиях Крайнего Севера // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – №. 11-3 (98). – С. 230-242.

4. Nasiri N., Rahbar N., Shemirani S. M. M., Nasab H. M., Khaksar A. Achieving thermal comfort through vernacular wisdom: a morphological typology of earth-sheltered dwellings in hot-arid climates (Semnan, Iran) // Energy and Buildings. – 2025. – С. 116552.

5. Parracho D. F. R., Nour El-Din M., Esmaeili I., Freitas S. S., Rodrigues L., Poças Martins J., ... Guimarães A. S. Modular construction in the digital age: A systematic review on smart and sustainable innovations // Buildings. – 2025. – Т. 15. – №. 5. – С. 765.

6. Hu M. Exploring low-carbon design and construction techniques: Lessons from vernacular architecture // Climate. – 2023. – Т. 11. – №. 8. – С. 165.

7. Ling T. Y. Rethinking greening the building façade under extreme climate: Attributes consideration for typo-morphological green envelope retrofit // Cleaner and Circular Bioeconomy. – 2022. – Т. 3. – С. 100024.

8. Pardo J. M. F. Challenges and current research trends for vernacular architecture in a global world: A literature review // Buildings. – 2023. – Т. 13. – №. 1. – С. 162.

9. Cooke A., Marsik T. Principles of northern housing design with examples from Alaska // Design and the Built Environment of the Arctic. – Routledge, 2023. – С. 141-161.

10. Eltaweel A., Saint R., D'Amico B., Pomponi F. A parametric thermal analysis of refugees' shelters using incremental design and affordable construction material // Energy and Buildings. – 2023. – Т. 290. – С. 113110.

References

1. Ogorodnikov S. N. Sposoby` povy`sheniya e`nergoe`ffektivnosti modul`ny`x zhily`x sistem v usloviyax Krajnego Severa // Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – №. 3 (72). – S. 182-195.
2. Volichenko O. V., Ogorodnikov S. N. E`ksperimental`naya modul`naya sistema povy`shennogo komforta dlya uslovij Krajnego Severa // Academia. Arxitektura i stroitel`stvo. – 2025. – №. 3. – S. 52-61.
3. Surovenkov A. V., Kraeva M. Yu. Arxitekturno-gradostroitel`noe obosnovanie organizacii obshhestvennogo prostranstva mnogofunkcional`ny`x zhily`x kompleksov v usloviyax Krajnego Severa // Mezhdunarodny`j zhurnal gumanitarny`x i estestvenny`x nauk. – 2024. – №. 11-3 (98). – S. 230-242.
4. Nasiri N., Rahbar N., Shemirani S. M. M., Nasab H. M., Khaksar A. Achieving thermal comfort through vernacular wisdom: a morphological typology of earth-sheltered dwellings in hot-arid climates (Semnan, Iran) // Energy and Buildings. – 2025. – P. 116552.
5. Parracho D. F. R., Nour El-Din M., Esmaeili I., Freitas S. S., Rodrigues L., Poças Martins J., ... Guimarães A. S. Modular construction in the digital age: A systematic review on smart and sustainable innovations // Buildings. – 2025. – T. 15. – No. 5. – P. 765.
6. Hu M. Exploring low-carbon design and construction techniques: Lessons from vernacular architecture // Climate. – 2023. – T. 11. – No. 8. – P. 165.
7. Ling T. Y. Rethinking greening the building façade under extreme climate: Attributes consideration for typo-morphological green envelope retrofit // Cleaner and Circular Bioeconomy. – 2022. – T. 3. – P. 100024.
8. Pardo J. M. F. Challenges and current research trends for vernacular architecture in a global world: A literature review // Buildings. – 2023. – T. 13. – No. 1. – P. 162.
9. Cooke A., Marsik T. Principles of northern housing design with examples from Alaska // Design and the Built Environment of the Arctic. – Routledge, 2023. – pp. 141-161.
10. Eltaweel A., Saint R., D'Amico B., Pomponi F. A parametric thermal analysis of

refugees' shelters using incremental design and affordable construction material // Energy and Buildings. – 2023. – Т. 290. – P. 113110.

Статья поступила в редакцию 10.03.2026; одобрена после рецензирования 05.05.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 10.03.2026; approved after peer review 05.05.2026; accepted for publication 28.08.2026.