

Анатольева Елена Андреевна

*магистрант, Чувашский государственный университет имени И.Н.
Ульянова*

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО МОНОЛИТНОГО ДОМОСТРОЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕСЪЁМНОЙ ОПАЛУБКИ

В статье рассмотрены современные технологии монолитного домостроения с применением несъёмной опалубки, совмещающей технологические, конструктивные и теплоизоляционные функции. Систематизированы основные виды несъёмных опалубочных систем и определены направления их развития. Рассмотрены системы на основе пенополистирола, цементно-минеральных материалов, высокопрочного и фиброармированного бетона, а также решения с применением аддитивных технологий. Выполнено сравнение технологий по теплотехническим, конструктивным, технологическим и организационным характеристикам. Установлено, что применение несъёмной опалубки позволяет объединить несколько строительных операций, снизить трудоёмкость и потенциально повысить энергетическую эффективность здания. Предложен подход к комплексной оценке эффективности технологии с учётом теплотехнических, технологических, организационных, экономических и экологических показателей.

This article examines modern monolithic housing construction technologies using permanent formwork, which combines technological, structural, and thermal insulation functions. The main types of permanent formwork systems are systematized and their development directions are identified. Systems based on expanded polystyrene, cement-mineral materials, high-strength and fiber-reinforced concrete, as well as solutions using additive technologies, are considered. The technologies are compared based on their thermal, structural, technological, and organizational

characteristics. It is established that the use of permanent formwork allows for the integration of several construction operations, reducing labor intensity, and potentially increasing the energy efficiency of a building. An approach to a comprehensive assessment of the technology's effectiveness is proposed, taking into account thermal, technological, organizational, economic, and environmental indicators.

Ключевые слова: монолитное строительство, несъёмная опалубка, энергоэффективность, ICF, SIP, теплоизоляция, монолитные стены, технология строительства, трудоёмкость, организация строительства.

Key words: monolithic construction, permanent formwork, energy efficiency, ICF, SIP, thermal insulation, monolithic walls, construction technology, labor intensity, construction organization.

1. Введение

Современное монолитное домостроение развивается в направлении повышения скорости строительства, снижения трудоёмкости и повышения энергетической эффективности зданий. Традиционная технология возведения монолитных стен требует выполнения операций по монтажу и демонтажу опалубки, а при необходимости повышения теплозащиты — последующего устройства теплоизоляционного слоя.

Одним из решений является применение несъёмной опалубки, которая после бетонирования сохраняется в составе конструкции. В зависимости от используемого материала она может выполнять функции формообразующего, теплоизоляционного, защитного и конструктивного элемента.

Исследования последних лет показывают расширение области применения несъёмных опалубочных систем. Рассматриваются ICF- и SIP-системы, постоянная опалубка из высокопрочного бетона, УНРС и фибробетона, а также конструкции, изготовленные методом 3D-печати [1–6].

Особый интерес представляет применение несъёмной опалубки в монолитном жилищном строительстве, поскольку совмещение опалубки и

теплоизоляции позволяет изменить не только конструкцию стены, но и организацию строительного процесса.

Целью исследования является анализ современных технологий энергоэффективного монолитного домостроения с применением несъёмной опалубки и определение перспективных направлений их совершенствования.

2. Теоретическая и методологическая основа исследования

В качестве теоретической основы исследования использованы актуальные научные публикации, посвящённые технологии монолитного строительства, применению несъёмной опалубки, энергоэффективности ограждающих конструкций, совершенствованию строительных процессов и оценке эксплуатационных характеристик зданий.

Методологическую основу исследования составляют методы системного и сравнительного анализа научных исследований, обобщение результатов экспериментальных и численных исследований, а также многокритериальная оценка эффективности конструктивно-технологических решений.

Особое внимание уделено исследованиям, рассматривающим несъёмную опалубку не только как средство формирования бетонной конструкции, но и как элемент, способный одновременно выполнять теплоизоляционную, защитную и конструктивную функции [1–6]. Отдельное направление анализа составили исследования организации и контроля процессов бетонирования конструкций с несъёмной опалубкой [8, 10, 16].

Для сравнительной оценки различных технологий приняты следующие критерии:

K1 — теплотехническая эффективность;

K2 — технологичность;

K3 — трудоёмкость строительных работ;

K4 — скорость возведения конструкций;

K5 — конструктивная эффективность;

К6 — материалоемкость;

К7 — экологическая эффективность.

Такой подход позволяет рассматривать эффективность применения несъёмной опалубки комплексно, с учётом взаимосвязи конструктивных, теплотехнических, технологических, организационных и экологических характеристик.

В дальнейшем результаты анализа используются для формирования авторского подхода к выбору рационального конструктивно-технологического решения для энергоэффективного монолитного домостроения.

3. Основные виды современных несъёмных опалубочных систем

3.1. Пенополистирольные системы ICF

Системы Insulated Concrete Form (ICF) представляют собой элементы из теплоизоляционного материала, формирующие оболочку бетонного ядра. После укладки бетона опалубка сохраняется в конструкции и одновременно выполняет функцию теплоизоляции.

Исследования показывают, что применение ICF позволяет объединить операции устройства опалубки и теплоизоляции. При этом эффективность системы зависит от толщины утеплителя, характеристик бетонного ядра и климатических условий.

Bruno и соавторы исследовали различные варианты SIP-конструкций для энергоэффективных зданий и установили, что расположение теплоизоляционного слоя оказывает существенное влияние на тепловой режим здания, энергопотребление и комфорт помещений [1].

Практическое исследование Ghosh и Bigelow, проведённое на пяти жилых домах в США, показало, что здания с ICF-наружными стенами имели более низкое энергопотребление по сравнению с рассмотренными вариантами

каркасных зданий; в исследуемой выборке снижение потребления электроэнергии достигало 41 % [2].

Полученные результаты подтверждают перспективность ICF, однако абсолютный энергетический эффект нельзя напрямую переносить на другие климатические условия. Для российских условий требуется отдельное теплотехническое и энергетическое моделирование.

3.2. Минеральные и композитные системы

Другим направлением являются несъёмные опалубки из цементно-минеральных материалов, фибробетона и высокопрочного бетона. В отличие от пенополистирольных систем, такие элементы могут обладать повышенной механической прочностью и участвовать в совместной работе с бетонным ядром.

Современные исследования УНРС-постоянной опалубки показывают возможность повышения несущей способности и жёсткости железобетонных элементов [4, 9, 11]. Аналогичные исследования выполняются для ЕСС-оболочек и других композитных систем [12].

Таким образом, развивается концепция несъёмной опалубки как **постоянного конструктивного элемента**, а не только как средства формирования геометрии бетонной конструкции.

3.3. Сталефибробетонная несъёмная опалубка

Перспективным решением является применение сталефибробетонной несъёмной опалубки. В российской практике подобные технологии исследуются применительно к конструкциям повышенной ответственности.

Коротких Д. Н. и соавторы отмечают возможности использования модульных конструкций с внешним листовым армированием для повышения индустриализации строительного процесса [8]. При этом постоянная оболочка усложняет визуальный контроль качества бетонирования.

Для решения этой задачи исследуются методы неразрушающего контроля. В частности, разработаны подходы к контролю качества укладки монолитного бетона внутри конструкций с несъёмной сталефибробетонной опалубкой [10].

4. Аддитивные технологии

Отдельным перспективным направлением является применение 3D-печати для изготовления постоянной опалубки.

Zhu и соавторы исследовали изготовление бетонной несъёмной опалубки для колонн методом 3D-печати. Эксперименты показали, что применение напечатанной оболочки может повышать жёсткость и несущую способность колонн по сравнению с традиционными бетонными элементами [5].

Развитие данного направления связано с возможностью изготовления оболочек сложной геометрии и оптимизации расхода материала. Однако широкое применение 3D-печатной несъёмной опалубки в массовом жилищном строительстве пока ограничивается стоимостью оборудования, требованиями к составу бетонных смесей, производительностью и необходимостью контроля качества межслойного соединения.

5. Энергоэффективность несъёмной опалубки

Основным показателем теплотехнической эффективности многослойной стены является сопротивление теплопередаче:

$$R = \sum(\delta_i / \lambda_i) + R_{si} + R_{se} \quad (1),$$

где δ_i — толщина i -го слоя конструкции, м; λ_i — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); R_{si} и R_{se} — сопротивления теплоотдаче внутренней и наружной поверхностей.

Для несъёмной опалубки увеличение толщины теплоизоляционного слоя приводит к повышению сопротивления теплопередаче, однако одновременно увеличивает толщину и стоимость стены. Поэтому максимальная толщина утеплителя не всегда является оптимальным решением.

Современные исследования подтверждают необходимость комплексной оценки теплотехнических характеристик. При этом необходимо учитывать климатические условия, влажностный режим, тепловую инерцию бетонного ядра и характеристики инженерных систем здания [1, 2].

Следовательно, оценивать энергоэффективность несъёмной опалубки целесообразно не только по теплопроводности отдельного материала, а на уровне всей конструкции и здания.

6. Влияние несъёмной опалубки на организацию строительства

Применение несъёмной опалубки изменяет последовательность строительных операций. При традиционной технологии необходимо выполнять монтаж опалубки, армирование, бетонирование, распалубливание и последующее устройство теплоизоляции.

При использовании интегрированной системы часть этих операций объединяется. Теплоизоляционный и формообразующий элементы устанавливаются до бетонирования и остаются в составе конструкции.

В результате потенциально сокращаются:

- количество технологических операций;
- трудозатраты;
- продолжительность строительного цикла;
- объём отходов от традиционной опалубки.

Однако эффективность зависит от организации бетонирования, площади захватки, состава рабочих звеньев, способа подачи бетонной смеси и устойчивости опалубки.

Поэтому внедрение несъёмной опалубки необходимо рассматривать одновременно с совершенствованием технологии и организации строительного процесса.

7. Комплексная оценка эффективности

На основании проведённого анализа предлагается рассматривать эффективность несъёмной опалубки как многокритериальную задачу.

В качестве авторского подхода может использоваться интегральный показатель:

$$E_{int} = w_1 E_t + w_2 E_o + w_3 E_c + w_4 E_l + w_5 E_e \quad (2),$$

где E_t — технологическая эффективность; E_o — организационная эффективность; E_c — экономическая эффективность; E_l — энергетическая эффективность; E_e — экологическая эффективность; w_i — весовые коэффициенты соответствующих критериев.

При выборе рационального варианта необходимо обеспечить выполнение следующих ограничений:

$$R \geq R_{req};$$

$$N \geq N_{req};$$

$$T \leq T_{lim};$$

$$C \leq C_{lim},$$

где R — фактическое сопротивление теплопередаче; R_{req} — требуемое сопротивление теплопередаче; N — расчётная несущая способность; N_{req} — требуемая несущая способность; T — продолжительность строительства; T_{lim} — предельно допустимая продолжительность; C — затраты; C_{lim} — предельно допустимые затраты.

Предложенная система является авторским подходом и в дальнейшем должна быть апробирована на конкретных конструктивно-технологических вариантах.

8. Обсуждение результатов

Анализ публикаций 2021–2026 гг. показывает, что развитие несъёмной опалубки осуществляется по четырём основным направлениям: повышение энергоэффективности, увеличение конструктивной эффективности, индустриализация строительных процессов и цифровизация производства.

ICF-системы наиболее перспективны для энергоэффективного жилищного строительства благодаря совмещению теплоизоляции и опалубки [1, 2]. УНРС-, ЕСС- и фибробетонные системы перспективны для конструкций, в которых постоянная оболочка должна участвовать в восприятии нагрузки [4, 8–12]. Аддитивные технологии создают возможности для производства элементов сложной геометрии и дальнейшей оптимизации конструкции [5].

Вместе с тем большинство исследований рассматривает отдельные характеристики системы. Поэтому перспективным является переход к комплексной оценке, учитывающей одновременно теплотехнические, конструктивные, технологические, организационные и экономические показатели.

9. Заключение

Современные несъёмные опалубочные системы постепенно превращаются из вспомогательного технологического элемента в интегрированную часть строительной конструкции. Их применение позволяет совмещать функции опалубки, теплоизоляции, защиты и, в отдельных случаях, конструктивной оболочки.

Наиболее перспективными для энергоэффективного монолитного домостроения являются ICF-системы, тогда как УНРС-, ЕСС- и фибробетонные решения представляют интерес для повышения конструктивной эффективности. Дополнительные возможности открывает применение 3D-печати [1–5].

Основными преимуществами технологии являются сокращение количества строительных операций, потенциальное снижение трудоёмкости и

продолжительности работ, а также повышение энергетической эффективности зданий. Одновременно сохраняются проблемы контроля качества бетонирования, обеспечения устойчивости опалубки, оценки стоимости и экологического воздействия.

Перспективным направлением дальнейшего исследования является разработка комплексной методики выбора рациональных параметров энергоэффективной несъёмной опалубки с учётом теплотехнических, конструктивных, технологических, организационных, экономических и экологических факторов. Такой подход может быть использован как основа для совершенствования технологии и организации монолитного домостроения.

Список используемой литературы

1. **Bruno R., Carpino C., Bevilacqua P., Settino J., Arcuri N.** A novel Stay-In-Place formwork for vertical walls in residential nZEB developed for the Mediterranean climate: hygrothermal, energy, comfort and economic analyses // *Journal of Building Engineering*. — 2022. — Vol. 45. — Article 103593. — DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103593.
2. **Ghosh S., Bigelow B.** Comparative Analysis of Energy Efficiency: Insulated Concrete Form vs. Wood-Framed Residential Construction // *Buildings*. — 2025. — Vol. 15. — No. 5. — Article 804. — DOI: 10.3390/buildings15050804.
3. **Wang X., Qi J., Wang Y., Cheng C., Wang Y., Wang L.** Mechanical properties of integrated dismantle-free external wall thermal insulation formwork // *Journal of Building Engineering*. — 2025. — Vol. 112. — Article 113808. — DOI: 10.1016/j.jobe.2025.113808.
4. **Yang Y., Chen B., Chen Y., Zhou H., Liu F., Xie X., Chen J., Guo W., Wang H.** Performances of Concrete Columns with Modular UHPC Permanent Formworks Under Axial Load // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. — 2023. — Vol. 17. — Article 38. — DOI: 10.1186/s40069-023-00608-1.

5. **Zhu B., Nematollahi B., Pan J., Zhang Y., Zhou Z., Zhang Y.** 3D concrete printing of permanent formwork for concrete column construction // *Cement and Concrete Composites*. — 2021. — Vol. 121. — Article 104039. — DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104039.

6. **Song S., Deng M., Zhang S., Hu X., Cao J., Bu X.** Flexural properties of reinforced concrete slabs using highly ductile concrete (HDC) permanent formwork system // *Journal of Building Engineering*. — 2023. — Vol. 80. — Article 108111. — DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.108111.

7. **Боронин Е. В., Сайманова О. Г.** Анализ особенностей использования несъемной опалубки из пенополистирола в монолитном строительстве // *Символ науки*. — 2023. — № 4-2. — С. 58–68.

8. **Коротких Д. Н., Корнев О. А., Белов В. В., Силантьев А. С., Капустин Д. Е.** Обзор опыта возведения АЭС с применением модульных конструкций с внешним листовым армированием // *Вестник МГСУ*. — 2024. — Т. 19. — № 10. — С. 1696–1712. — DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1696.

9. **Abbas Z. H., Gorgis I. N., Hassan M. S.** Cross-sectional shape effect of stay-in-place formwork column on axial compressive behaviour // *Journal of Building Engineering*. — 2024. — Vol. 90. — Article 109417. — DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.109417.

10. **Коротких Д. Н., Дорф В. А., Капустин Д. Е., Зейд Килани Л. З.** Контроль качества укладки монолитного бетона в конструкции с несъемной сталефибробетонной опалубкой // *Строительные материалы*. — 2024. — № 11. — С. 31–39. — DOI: 10.31659/0585-430X-2024-830-11-31-39.

11. **Huang J., Wang P., Shi Q., Rong C. и др.** Flexural behavior and numerical simulation of reinforced concrete beams with a UHPC stay-in-place formwork // *Structures*. — 2024. — Vol. 69. — Article 107254. — DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107254.

12. **Axial compressive behavior and design of semi-precast steel reinforced concrete composite columns with permanent ECC formwork** // Structures. — 2023. — Vol. 57. — Article 105130. — DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105130.
13. **Yu Q., Zuo Q., Zhang Y., Pan J.** An investigation on enhancing the bonding properties of 3D printed concrete permanent formwork and post-casted concrete // Construction and Building Materials. — 2024. — Vol. 444. — Article 137841. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137841.
14. **Liu B., Guo Y., Wang Y., Liu Q., Hu Y., Wang L.-G., Qian K.** Study on the compression performance of 3D printing concrete permanent formwork composite columns // Journal of Building Engineering. — 2024. — Vol. 98. — Article 111245. — DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.111245.
15. **Liu B., Cheng X.-M., Wang L.-G., Qian K.** Compressive performance of PVA fiber-reinforced 3D concrete printing permanent formwork composite columns reinforced with BFRP bars // Journal of Building Engineering. — 2024. — Vol. 98. — Article 111174. — DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.111174.
16. **Freund B., Proske T., Graubner C.-A.** Fresh concrete pressure on vertical and inclined formwork systems: full-scale experimental investigations and numerical modeling // Materials and Structures. — 2026. — Vol. 59. — Article 119. — DOI: 10.1617/s11527-026-03001-y.
17. **Alwan Z., Ilhan Jones B.** IFC-based embodied carbon benchmarking for early design analysis // Automation in Construction. — 2022. — Vol. 142. — Article 104505. — DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104505.
18. **Deng X., Lu K.** Multi-level assessment for embodied carbon of buildings using multi-source Industry Foundation Classes // Journal of Building Engineering. — 2023. — Vol. 72. — Article 106705. — DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106705.