

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ БЕТОНОМ

Мирзахорова Мехрибон Марат кизи

Ташкентский государственный транспортный университет, докторант

*E-mail:* [mirzaxonovamehribonu@gmail.com](mailto:mirzaxonovamehribonu@gmail.com)

**ВВЕДЕНИЕ.** В последние годы в строительной отрасли всё шире применяются аддитивные технологии, в частности метод 3D-печати бетоном (3D concrete printing). Эта технология позволяет формировать стеновые конструкции без традиционных трудоёмких опалубочных работ, путём послойного нанесения бетонной смеси с помощью устройства, управляемого компьютерной программой. В большинстве случаев 3D-принтер печатает стеновую конструкцию в виде двух параллельных тонких бетонных слоёв ("оболочек"), между которыми оставляется полость, выполняющая функцию теплоизоляции. Именно материал, выбираемый для заполнения этой полости, становится одним из решающих факторов, определяющих общую теплотехническую эффективность, массу и себестоимость конструкции.

Актуальность данного тезиса заключается в том, что единый, научно обоснованный подход к изоляционным материалам, применяемым в стеновых конструкциях, напечатанных методом 3D-печати, пока полностью не сформирован. Наряду с традиционными теплоизоляционными материалами (минеральной ватой, экструдированным пенополистиролом и др.) неавтоклавный газобетон также рассматривается как перспективный материал, который может применяться с этой целью благодаря относительно низкой себестоимости, возможности производства на базе местного сырья и удовлетворительным теплотехническим показателям. Однако такое применение требует учёта специфических технологических и конструктивных требований — в том числе чувствительности газобетона к влаге, его сцепления (адгезии) с бетонными оболочками, а также вопросов предотвращения мостиков холода.

Цель исследования — раскрыть научно-технические основы применения неавтоклавного газобетона в качестве теплоизоляционного заполнителя в стеновых конструкциях, возводимых по технологии 3D-печати бетоном, а также выработать практические рекомендации.

Задачи исследования заключаются в следующем:

1. изучить сущность технологии 3D-печати бетоном и типовую структуру стеновой конструкции;
2. проанализировать теплофизические и физико-механические свойства неавтоклавного газобетона с точки зрения соответствия требованиям 3D-печатных стен;
3. осветить вопросы технологической совместимости, адгезии и влажности между газобетонным заполнителем и бетонными оболочками;

4. обосновать методы предотвращения мостиков холода и практико-нормативные рекомендации.

**Ключевые слова:** неавтоклавный газобетон; 3D-печать бетоном; теплоизоляционный заполнитель; стеновая конструкция; бетонные оболочки; адгезия; влагообмен; мостики холода; коэффициент теплопроводности; плотность; гидрофобизирующая обработка; полимерцементный адгезивный слой; энергоэффективность.

**1. ТЕХНОЛОГИЯ 3D-ПЕЧАТИ БЕТОНОМ И ТИПОВАЯ СТРУКТУРА СТЕНОВОЙ КОНСТРУКЦИИ.** 3D-печать бетоном — это способ формирования стеновых конструкций без опалубки путём послойного нанесения специально составленной бетонной смеси (как правило, мелкофракционной, быстротвердеющей композиции цемента и песка с высокой тиксотропностью) с помощью цифрового экструзионного устройства [3]. Основными преимуществами этой технологии являются ускорение процесса строительства, сокращение затрат человеческого труда и потерь материала, а также возможность реализации сложных геометрических форм. Большинство современных систем 3D-печати печатают стену не в виде единого массива, а в виде двух тонких (обычно толщиной 30–50 мм) параллельных бетонных оболочек, между которыми оставляется полость шириной 100–250 мм. Эта полость образует теплоизоляционный слой стены, что порождает необходимость его заполнения целевым материалом [3].

Стеновая конструкция с незаполненной полостью не обладает достаточной теплотехнической эффективностью, поскольку воздушная прослойка увеличивает теплопотери за счёт конвекции. Поэтому на этапе проектирования первостепенное значение приобретает вопрос заполнения полости между бетонными оболочками целевым теплоизоляционным материалом. Такой заполняющий материал должен отвечать ряду требований: обладать низким коэффициентом теплопроводности, быть лёгким (не увеличивать общую массу конструкции), быть технологически совместимым с процессом печати (последовательным послойным нанесением) и обеспечивать достаточное сцепление с бетонными оболочками (или, как минимум, размещаться в полости без их повреждения) [1].

**2. СВОЙСТВА НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА КАК ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ.** Неавтоклавный газобетон — это пористый, лёгкий материал, получаемый путём твердения при атмосферном давлении смеси на основе цемента, извести, кремнезёмистого наполнителя и газообразующего вещества; его средняя плотность составляет 400–800 кг/м<sup>3</sup>, а коэффициент теплопроводности — 0,10–0,21 Вт/(м·К) [2]. Именно эти низкая плотность и низкая теплопроводность делают его привлекательным для заполнения полости между двумя бетонными оболочками 3D-печатной стены: в отличие от традиционных тяжёлых заполнителей, газобетон не увеличивает существенно общую массу конструкции, что снижает нагрузку на фундамент и расходы на транспортировку материалов [4].

Ещё одним преимуществом применения газобетона в качестве заполнителя является его относительно высокая теплоёмкость и тепловая инерция, что способствует стабилизации внутреннего микроклимата здания. При этом, поскольку конструктивная (несущая) прочность газобетона невысока (около 0,5–3,5 МПа), его целесообразно применять исключительно в качестве изоляционного заполнителя, то есть слоя, не выполняющего несущую функцию, а обеспечивающего лишь собственный вес и теплозащиту, — основную конструктивную нагрузку при этом воспринимают наружная и внутренняя бетонные оболочки, а также расположенная между ними арматура или соединительные элементы [2], [4].

**3. ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ, АДГЕЗИИ И ВЛАЖНОСТИ.** Существует два основных способа размещения газобетонного заполнителя между бетонными оболочками, напечатанными методом 3D-печати: послойная укладка готовых газобетонных блоков (или плит) либо заливка газобетонной смеси непосредственно в полость в монолитном виде. В обоих случаях важно обеспечить достаточно прочное сцепление в зоне контакта между бетонной оболочкой и газобетонным заполнителем, поскольку в противном случае в процессе эксплуатации между слоями могут образоваться пустоты, снижающие эффективность теплоизоляции. Здесь вновь проявляется рассмотренная ранее проблема — высокая капиллярная всасывающая способность газобетона: если газобетон находится в непосредственном контакте со свежей, ещё не затвердевшей бетонной смесью, он быстро вытягивает из неё влагу, что может нарушить нормальную гидратацию бетонной оболочки и привести к образованию микротрещин в зоне контакта [2].

Поэтому перед установкой газобетонного заполнителя рекомендуется обработать его поверхность специальным грунтом (праймером) или гидрофобизирующим составом, а также использовать в зоне контакта специальный адгезивный слой на полимерцементной основе — это позволяет как регулировать влагообмен, так и укрепить механическое сцепление между слоями [4]. Кроме того, арматура или специальные соединительные элементы (tie-элементы), связывающие бетонные оболочки между собой, могут выполнять функцию мостика холода, увеличивая теплопотери. Оптимизация количества и площади сечения таких элементов, а также размещение вокруг них дополнительного теплоизоляционного экрана позволяют значительно снизить негативное влияние мостиков холода [1], [4].

**4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И НОРМАТИВНО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА.** При применении газобетона в качестве заполнителя в стеновых конструкциях, напечатанных методом 3D-печати, целесообразно придерживаться следующих практических рекомендаций: выбирать в качестве заполнителя газобетон низкой плотности (400–500 кг/м<sup>3</sup>), поскольку это максимально повышает теплоизоляционную эффективность; перед установкой газобетонных блоков доводить их влажность до нормативного уровня (как правило, 25–35%), не допуская применения переувлажнённого газобетона; в зонах контакта использовать

гидрофобизирующую обработку и специальные адгезивные слои; а также оптимизировать соединительные элементы с теплотехнической точки зрения по всей высоте конструкции с целью минимизации мостиков холода [1]. С экономической точки зрения дешёвое производство газобетона на базе местного сырья и его лёгкость снижают затраты на транспортировку и монтаж, что делает его особенно экономически целесообразным решением при применении в сочетании с технологией 3D-печати в местных условиях [3]. При этом на этапе проектирования необходимо расчётным путём подтвердить соответствие требованиям нормативных документов Республики Узбекистан в области энергоэффективности и теплотехники [2].

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Проведённый анализ показывает, что неавтоклавный газобетон благодаря низкой плотности, удовлетворительным теплотехническим показателям и относительно невысокой себестоимости представляет собой перспективное решение, которое может применяться в качестве теплоизоляционного заполнителя в стеновых конструкциях, возводимых по технологии 3D-печати бетоном. Однако такое применение требует научно обоснованного учёта таких факторов, как чувствительность газобетона к влаге, адгезионные свойства в зонах контакта и мостики холода. Гидрофобизация поверхности, применение специальных адгезивных слоёв и теплотехническая оптимизация соединительных элементов позволяют эффективно устранить эти проблемы. Изложенные в настоящем тезисе научно-технические основы служат специалистам и студентам, работающим в сфере аддитивных строительных технологий, для формирования теоретической и практической базы корректного и эффективного применения газобетона в стеновых конструкциях, напечатанных методом 3D-печати.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строительные нормы и правила Республики Узбекистан (КМК) — требования к теплотехнике и энергоэффективности стеновых конструкций.
2. Стандарты O'zDST — требования к лёгкому бетону, газобетону и теплоизоляционным материалам.
3. Научно-техническая литература и статьи по аддитивным строительным технологиям (3D-печать бетоном).
  1. Технические регламенты производителей 3D-принтеров и практические руководства по строительному проектированию.
  2. Energy efficiency and economic advantages of non-autoclaved gas concrete walls. International Journal of Artificial Intelligence, ISSN: 2692-515X.