

3D нам строить и жить помогает?

Аддитивное производство, чаще именуемое 3D-печатью, определяется как процесс создания трехмерных объектов путем нанесения слой за слоем материалов в соответствии с цифровой 3D-моделью объекта. 3D-печать, позволяющая создавать сложные конструкции и формы при минимизации ручного труда, уже произвела революцию в различных отраслях промышленности. Использование этой технологии вышло далеко за первоначальные рамки эксперимента, прототипирования и разового изготовления демонстрационных экземпляров, что подтверждает ее статус полноценного инструмента в арсенале промышленного производства и строительства XXI века.

Резко возросший в последнее время потенциал используемых методов и материалов 3D-печати привел к расширению применения этой технологии в количественном и качественном отношении. Этому способствует и достигаемый с ее помощью уровень автоматизации и стандартизации производства,

и расширяющийся ассортимент материалов для печати, в который уже входят новые виды бетона, пластмассы, светочувствительные смолы, керамика, термопластичные композиты и даже стволовые клетки.

При этом, как и любая другая новейшая технология, 3D-печать сталки-

вается с различными проблемами роста – объективными факторами, не позволяющими ей полностью заменить собой старые, традиционные методы производства, и пока остается интересным и перспективным феноменом из категории технологий будущего.

Давайте рассмотрим этот феномен всесторонне, с точки зрения как теории, так и практики. Предлагаемый вашему вниманию материал включает теоретический анализ, представленный учеными из Московского государственного строительного университета (МГСУ) – пионерами в области российской и мировой научной разработки строительной 3D-печати, и рассказ инженера компании «Газпром нефть» о практическом применении этой технологии в условиях Крайнего Севера. Наконец, рассматриваемую тему ярко иллюстрируют краткий экскурс в историю применения 3D-печати в строительстве и подборка новостей 2023 года из различных регионов России и стран мира о «напечатанных» зданиях, интересных стартапах и нормативно-правовых актах в области применения 3D-печати в строительстве.

Журнал «Информационное моделирование» беседует с учеными, инженерами-разработчиками и педагогами МГСУ, стоявшими у истоков фундаментальных исследований в области строительной 3D-печати, – Андреем Петровичем Пустовгаром и Олегом Васильевичем Кабанцевым.



Андрей Пустовгар,
научный руководитель НИИ СМиТ,
к.т.н., доцент

Андрей Петрович, давайте начнем беседу с азов: зачем вообще строительству нужны аддитивные технологии?

Я считаю, что без индустриализации строительного производства и, в частности, без аддитивных тех-

нологий, будущее интенсивного развития строительства выглядит весьма туманно. По пути индустриализации строительства идут Китай, США, Япония, Сингапур, Германия и другие страны ЕС, Великобритания. Дело в том, что основные проблемы строительной отрасли – это большое количество ручного труда и нехватка рабочей силы. Аналогичная ситуация 70 лет назад была в автомобилестроении, когда большое количество рабочих выполняло монотонную физическую работу на конвейере. А сейчас автомобилестроитель, по сути – оператор робототехники, и работа там более привлекательна. Со временем то же будет и на стройке.

Следующий аспект – производительность труда. В машиностроении за 70 лет произошел серьезный скачок производительности труда за счет автоматизации и роботизации производства, в результате чего производительность труда, например, в автомобилестроении сейчас более чем в 5 раз выше, чем в строительстве – и это характерно для всех стран мира.

Повышение производительности труда в строительстве – одна из первоочередных задач. Внедрение аддитивных технологий – это реальный путь повысить в отрасли производительность труда до уровня автомобилестроения. В МГСУ об этом говорили всегда – с тех пор, как в 2006 году приступили к разработке бетонных составов для 3D-печати. Тогда еще было очень мало 3D-принтеров, но одной из первых стран, в которых они появились, была Россия.

А в каком году они у нас появились?

Первый строительный принтер, который мог печатать строительными растворами или мелкозернистым бетоном появился в России в 1998 году. Это были некие прототипы, лабораторные варианты. Почему-то сейчас приоритет незаслуженно отдается зарубежным странам, в частности, китайской компании Winsun, чей 3D-принтер был разработан и впервые представлен в 2014 году, но все идеи и опытные образцы вначале появились у нас. Взять, например, COBOD (Construction Building

On Demand) – есть такая бельгийская фирма, один из основных производителей строительных 3D-принтеров. В 2017 году у них появился в производстве 3D-принтер, по сути, – улучшенная копия российского принтера, произведенного компанией «Спецавиа» в Ярославле. В COBOD его использовали как прототип или просто как бы... «позаимствовали». Купили у них первый принтер, разобрали его, поняли идею, напичкали достаточно хорошим оборудованием с точки зрения управления процессами – прежде всего, электроникой. Но идея осталась та же самая – порталный принтер.

Следующий пример разработки российского происхождения – компания Aris Cor. Здесь уже другой вид принтера – кранового типа с телескопической стрелой. Он сейчас тоже копируется американцами в других странах.

Что послужило стимулом к развитию строительства посредством 3D-печати?

В 1970-е годы в Советском Союзе наблюдался интенсивный рост производительности труда. Этот рост дала индустриализация строительства, когда мы возводили жилье на 90% из сборного железобетона. И не только жилье – все промышленное строительство базировалось на сборном железобетоне. Уже тогда формализация процессов, типизация и унификация в строительстве в СССР была развита на голову выше, чем во всех других странах. Была только одна проблема – архитектурный облик зданий, он также был типовым. Но если говорить объективно, то в конце 1970-х годов в СССР строительная отрасль была подготовлена к внедрению технологий информационного моделирования (ТИМ), только в то время не было такого инструмента. А если бы тогда внедрились ТИМ, то наш строительный комплекс был бы в мире передовым. Для внедрения ТИМ в строительстве важно формализовать задачи, а в строительстве, в основном, есть плохо структурированные и неструктурированные задачи. Здесь количественных задач, описываемых математически, не так много по сравнению с качествен-



Печать несъемной опалубки колонны круглого сечения

Фото из архива МГСУ

ными задачами. В Советском Союзе формализация отразилась в нормативных документах, что привело к появлению СНиП, потребовала унификации, типизации в строительстве и внедрения единой модульной системы при проектировании. Строительный комплекс как никогда был готов к внедрению информационных технологий, потому что все было формализовано. Более того, в это же время развивалось станкостроение с цифровым управлением, так называемые станки с ЧПУ. Соответственно, это второй элемент цифровизации строительства и внедрения аддитивных технологий.

Но еще не было компактных средств электронной вычислительной техники. Здравый смысл не позволял тогдашним строителям (то есть тем, которым сейчас по 50–60 лет) притащить БЭСМ-6 на строительную площадку – это было бы странно. Хотя с ее помощью можно было все это сделать – в то время это была одна из лучших вычислительных машин в мире. Но уже появлялись станки с ЧПУ. Это ведь достаточно компактные системы, у которых были так называемые управляющие програм-



Печать колонны прямоугольного сечения

Фото из архива МГСУ

мы – мониторы, а это уже элементы промышленных ЭВМ. По сути дела, это были компактные блоки, которые управляли определенными технологическими операциями. Чтобы 3D-принтер работал в строительстве (например, чтобы передвигалась каретка с печатающей головкой по портальной системе), требуются те же управляющие программы и перевод чертежей в цифру, понятную для станка с ЧПУ. Поэтому теоретически начинать делать это уже тогда было возможно. Те же самые компьютеры для управления, например, системой противоракетной обороны, ракетных войск, теоретически позволяли сделать то же самое в строительстве при геопривязке площадки и нулевой точке 3D-принтера.

А с конца 1980-х начались деструктивные процессы: мы с 95% индустриального строительства скатились практически до нуля и перешли на строительство монолитное. А что это такое? Это строительство в индивидуальном стиле – архитекторы и проектировщики видят в нем путь к разнообразию архитектуры зданий. Соответственно, каждая стройка как новая. При этом создается иллю-

зия, что весь процесс заключается в укладке бетона, и это может делать кто угодно. А о заготовительных, транспортных, арматурных, опалубочных работах, о том, что нужен уход за бетоном в сложнейших погодных условиях, и о том, что конструкции от проекта к проекту существенно отличаются, забывают.

А какие новые возможности даст нам повсеместное применение аддитивного производства в строительстве?

Даже при обеспечении в строительстве грандиозного разнообразия все процессы и операции можно хорошо формализовать и свести к типовым. Как, например, это сделано в автомобилестроении. Посмотрите, как меняются модельные ряды автомобилей, при этом отдельные узлы – двигатель, подвеска и тому подобное, в большой степени унифицированы, но мы ощущаем их дизайнерское разнообразие, и производятся они на одной роботизированной конвейерной линии. Это можно сделать и в строительстве с той лишь разницей, что при производстве автомобилей изделие движется по конвейеру от одной технологической операции к другой, а здание остается неподвижным, и технологические операции будут выполнять, например, 3D-принтер, двигаясь и производя последовательно технологические операции. Как это происходит? Вы берете информационную модель, конвертируете ее в программу для 3D-принтера и всё: принтер начинает строительство. На принтерах устанавливаются датчики лазерного сканирования, которые автоматически заносят в эту же систему исполнительную документацию. Вот вам стыковочный модуль. Соответственно, вы получаете следующую модель, в автоматическом режиме дополненную атрибутами строительства, а не формируете ее с помощью работников из дальнего и ближнего зарубежья, которые это по определению сделать не могут.

В процессе ведь тоже начинается какое-то физическое отклонение?

В процессе лазерного сканирования вы получаете «облако точек»,



а из него – информационную модель объекта. Соответственно, выполняя в автоматическом режиме сравнение виртуальной информационной модели и построенного по факту, вы автоматически получаете информацию о возникновении коллизии и можете внести корректировки и продолжить строительство. По сути, то же самое происходит при проектировании с использованием информационного моделирования: если обнаруживается коллизия (например, трубопровод или вентиляционный короб упирается в несущую конструкцию), проектировщик получает сигнал о возникновении коллизии между основными комплектами проектной документации.

И в итоге издержки должны сократиться?

Конечно, это сократит издержки! Прежде всего, за счет ускорения процесса строительства. Аддитивные технологии значительно сокращают время, необходимое для строительства зданий, и позволяют существенно снизить материалоемкость и потребность в рабочей силе, одновременно повышая производительность труда, а также снижают количество брака за счет постоянного точного контроля возникновения возможных коллизий при возведении строительных конструкций. Сокращение издержек происходит также за счет упрощения технологии возведения строительных конструкций сложной формы: для 3D-печати не нужны специальные виды опалубок и исключены операции выверки, временного закрепления и геодезического контроля формы. Аддитивные технологии позволяют создавать здания и конструкции, уникальные по дизайну. По мере необходимости с помощью 3D-печати можно быстро и легко, без дополнительных затрат, изменять и модифицировать дизайн здания прямо в ходе строительства. А еще применение аддитивных технологий способствует повышению безопасности рабочих на строительных объектах. С помощью роботизированного строительства можно минимизировать риски для работников, особенно в опасных или труднодоступных местах.

И, конечно, в современных условиях аддитивные технологии обеспечивают стабильность темпа строительства (мы уже говорили, что рабочих строительных специальностей на площадках не хватает, а если нет рабочих, стройка встает).

А как такая стройка изменит условия труда самих рабочих?

А вы представьте: на улице снег, мороз и сильный ветер, а вам нужно пройти от квартиры до магазина. В большинстве ситуаций вы можете отложить свой поход, а строителю в таких условиях приходится работать целый день. Причем никого не волнует, в каких условиях он построил здание, – оно в итоге должно быть качественным, надежным, теплым и комфортным. И не всегда строителю за выполненную в таких условиях работу говорят «спасибо». Еще и крепкими словами могут обложить, а иногда и зарплату не выплатить. А внедрение 3D-печати и аддитивных строительных технологий повышает престиж профессии инженера-строителя в сравнении с линейным работником на классической стройке. Один месит в сапогах грязь и снег в любую погоду, другой сидит в комфортной рабочей обстановке и занимается творческой работой, контролируя процесс дистанционно. Действительно, это привлекательная и престижная работа, когда ты создаешь и при этом имеешь хорошие условия труда. Я считаю, это серьезный повод для того, чтобы интенсивно заняться роботизацией и внедрением 3D-печати в строительстве.

В 2018 году в качестве партнеров Aris Cor мы участвовали в конкурсе проектов строительства на Марсе, объявленном НАСА. Мы осуществляли там техническую поддержку. Задача была – строить дома вообще без присутствия людей на строительной площадке – и это было реализовано. Вот что такое внедрение аддитивных технологий! Там не рабочие нужны, а инженеры – которых, правда, тоже нужно готовить по другим программам. И не просто что-то рассказывать и показывать красивые картинки, а давать практические навыки и обучать поэтапно, пошагово всем технологическим процессам. Пото-

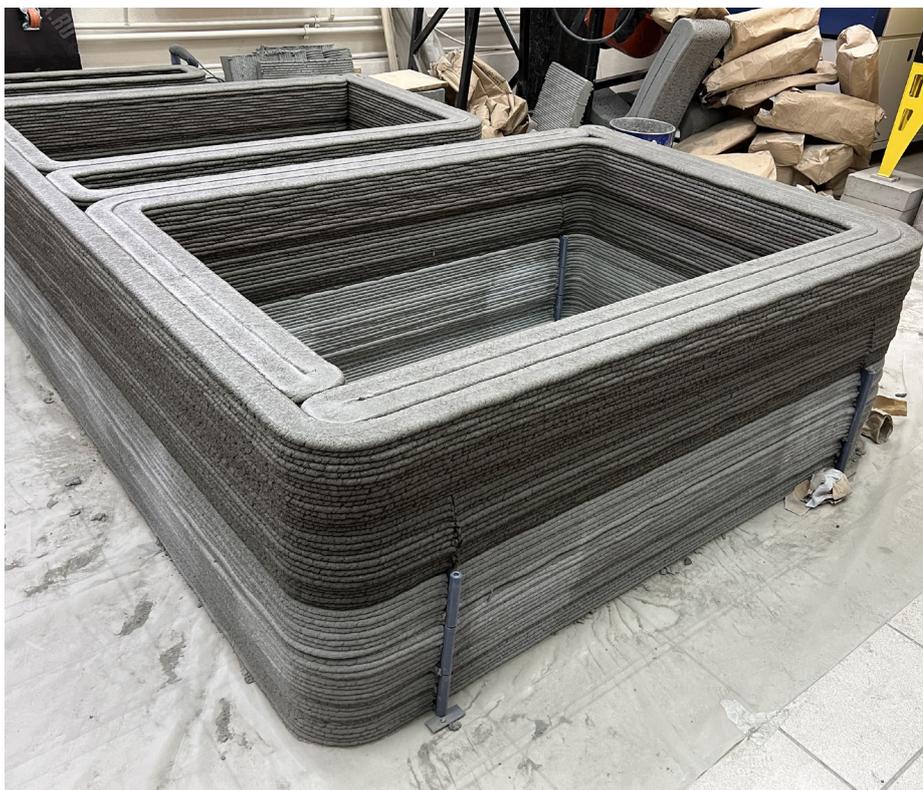
му что стройка – это, прежде всего, практика, без которой невозможно организовать эффективный процесс обучения. Это вообще кардинально меняет сознание строителя, поэтому нужно изменить всю систему. Без этого дальнейшее интенсивное развитие строительства невозможно.

Возьмем для примера проект Aris Cor, который был реализован в Объединенных Арабских Эмиратах. Для российской стройки это тот же Марс, потому что там используются другие компоненты для бетона, другое нормативное обеспечение. Там действуют британские нормы. Работая там, мы обеспечили им техническую поддержку, доказав, что российские нормы не хуже, а иногда и лучше британских, и позволяют с высокой степенью надежности строить даже в сейсмоопасных зонах, где возможны землетрясения мощностью до девяти баллов. Компоненты бетона подобрали из местных материалов. В результате командной работы был построен самый большой в мире дом, попавший в Книгу рекордов Гиннеса. А после того как он был построен, в ОАЭ на государственном уровне постановили, что к 2030-му году 30% домов должны строиться с применением аддитивных технологий. Ведь там такая же проблема нехватки строительных рабочих и, соответственно, приток мигрантов. Только строители у них не из Центральной Азии, как у нас, а из Южной: Пакистана, Бангладеш. А проблемы одинаковые, никакой разницы. То же самое происходит в Европе и США.

Но я надеюсь, что в мае будущего года Россия опередит ОАЭ и построит дом еще больше. В Татарстане планируется строительство такого объекта.

А сколько нужно людей для обслуживания самого принтера?

Нужен один человек – 3D-инженер/менеджер, который просто в режиме онлайн управляет работой принтера и следит за его регламентным обслуживанием. Ну, еще, может быть, один человек для управления электроникой. Могут быть сбои программ, вопросы связи, перехода файлов, конвертации и так далее. Ну, и стро-



Печать образцов ограждающих конструкций для определения стойкости к климатическим воздействиям

Фото из архива МГСУ

итель – три. И вместо ста человек на площадке такой же объем строительных работ будут выполнять три человека. Еще уровень производительности труда зависит от того, что именно печатает принтер – один дом или сразу целую улицу (это тоже возможно). И чем больше зданий вы печатаете за один проход принтера, тем эффективнее его применение.

Тут возникает еще два вопроса, связанных с общей темой. Допустим, по всей стране широко внедряется 3D-печать. Во-первых, для этого потребуется большое количество новых специалистов – тех, кто изготавливает сами принтеры. Ведь их сейчас еще практически нет. И во-вторых, для этого нужны специальные материалы, не те, что сейчас применяются на обычной стройке. Специальные бетоны и тому подобное. Ведь их теперь тоже надо будет производить в промышленных масштабах. Значит, промышленности придется перестраиваться?

Абсолютно правильный и хороший вопрос! Любой проект, любое направление в развитии отрасли

должно быть обеспечено всеми составляющими. От кадров и нормативно-технической документации до материалов и оборудования, которое будет применяться в рамках развития данной подотрасли или отрасли, без этого развитие невозможно. Как я уже говорил, для подготовки кадров надо кардинально изменить программу обучения. Это, кстати, привлекательная задача для профтехучилищ. Необходимо обучать новым навыкам, готовить людей, которые будут работать в отрасли через три года, через пять лет. Нужно видеть перспективу. Уже сейчас бесполезно готовить специалистов по уходящим технологиям. Через два года они уже не будут применяться, а специалисты будут выпущены, и их заново придется обучать.

Что касается материалов: когда начинаешь заниматься этим фундаментально, необходимо учитывать менталитет строителей. Как правило, строители ничего абсолютно нового не приемлют. И говорят: «Ты на стройке-то был? Приди, посмотри, что там творится!». Если им просто заявить, что есть такой материал, и мы хотим предложить им его внедрять, то внедрим мы его лет через 20. Поэ-

тому основное условие внедрения чего-либо на стройке – это наличие готовой технологии, понятной производителю работ и потребителю и обеспеченной доступными материалами и оборудованием. Мы в свое время участвовали в создании в России отрасли по производству сухих строительных смесей практически с нуля. Это те же самые мелкозернистые бетоны, строительные растворы в сухом виде, которые вы можете перевозить в любую точку, на любые расстояния, а непосредственно на месте применения после затворения водой получать мелкозернистый бетон и строительный раствор, производя соответствующие работы. Сейчас в стране почти 300 производителей сухих строительных смесей, они располагаются практически во всех федеральных округах России и практически все готовы производить смеси для 3D-печати. Поэтому из отдельных элементов мы пытаемся создать единую отрасль аддитивных технологий, аддитивного строительства.

Здесь важны и вопросы организации строительства, потому что время схватывания и другие подобные характеристики определяют продолжительность рабочего процесса, влияют на сетевой график, пересечение с другими видами работ, установку арматурных каркасов и так далее. Поэтому мы не изобретаем велосипед, а просто пытаемся модернизировать строительную отрасль на основе существующих компонентов с применением появившихся новых знаний в области электроники, цифровизации и тому подобного.

Конечный потребитель, то есть житель, поселившись в напечатанном доме, будет как-то ощущать разницу?

В принципе, нет. Сейчас существует множество архитектурных стилей: кто-то применяет отделку в стиле классицизма, кто-то – минимализма, кто-то – барокко и так далее. Любители индивидуальных стилей, безусловно, будут ощущать разницу, но будет и много потребителей, которых устроит предложенный стиль. Есть ряд моментов, пока ограничивающих разнообразие поверхностей, напечатанных на 3D-принтере. С помощью



принтера мы можем делать практически любую форму здания и любую поверхность стены – волнообразную, гладкую и т.п., но есть пока проблемы с печатью перекрытий и горизонтальных пролетных конструкций: можно печатать только конструкции арочного типа. Но это решаемые проблемы, и определенные решения есть уже сейчас.

Ваш прогноз: когда 3D-печать станет полноправным конкурентом традиционной стройке, свободным от технических ограничений, и можно будет печатать дома любой формы и высоты?

Уже сейчас можно печатать дома любой формы и любой высоты. Только это не процесс возведения здания целиком. Есть понятие строительства «под ключ»: вы поставили 3D-принтер, он напечатал, вы ключи отдали, а там уже двери, окна стоят. Так вот этого пока нет. Но процесс возведения ограждающих конструкций, перегородок, колонн, арочных перекрытий – это уже реальность. Я думаю, через год будет освоена печать горизонтальных конструкций, а через 3-4 года появится и возможность возводить дома «под ключ».

А теплоизоляция, усиленное армирование для сейсмоопасных районов, дизайн фасада, внутренняя отделка?

Уже сейчас можно печатать наружные ограждающие конструкции с требуемым термическим сопротивлением для любого региона, поэтому проблем с теплоизоляцией зданий нет. Работы по армированию конструкций пока в большинстве случаев выполняются вручную, но уже появились 3D-принтеры со встроенной роботизированной системой установки арматуры. Что касается сейсмически опасных районов – это вопрос конкретного проекта: если им предусмотрено такое армирование, то при строительстве с использованием 3D-принтера мы обязаны это сделать. В дизайне фасадов с использованием 3D-печати уже сейчас мы имеем возможность реализовать практически любую творческую идею архитектора или дизайнера. Вопросы выполнения отделочных работ и раз-

нообразия внутренней отделки, думаю, будут решены в течении 2-3 лет.

А мы когда-нибудь придем к повсеместному строительству с применением 3D-печати без ограничений? Или это вообще невозможно, и какие-то виды зданий так и останутся объектами классической стройки?

3D-печать «под ключ» придет. Как я отмечал ранее, это вопрос ближайших лет, и будет она реализовываться как единый бесшовный процесс – от изысканий и проектирования до строительства. И здесь важную роль сыграет информационное моделирование, охватывающее весь жизненный цикл здания. Сейчас для этапа строительства используются разрозненные элементы – беспилотная доставка конструкций оконных и дверных блоков, плит перекрытия с RFI-метками, которые прописываются, считываются и сразу идут в монтаж в проектное положение. По времени все монтажные операции согласованы с печатью несущих и ограждающих конструкций. Я думаю, что аддитивное строительство полномасштабно войдет в нашу жизнь максимум в ближайшие 5-10 лет. И это будет настоящий прорыв в строительстве. Не зря Минстрой сейчас этим интенсивно занимается. Значит, уже есть понимание на государственном уровне перспективности использования аддитивных строительных технологий. А классическая стройка, безусловно, останется, но массовое строительство будет индустриальным.

Теоретически, массовое внедрение 3D-печати должно снизить количество проблем, присущих обычной стройплощадке, – от уровня до безопасности?

Естественно! Вы абсолютно правы, нужно учитывать еще и совокупный социальный эффект – снижение травматичности, профессиональных заболеваний (рабочие не будут массово задействованы в работах на высоте, в сварочных работах в стесненных условиях, не будут дышать цементной пылью). Мы в свое время разработали метод и добавку для производства беспыльных сухих

строительных смесей и цементов и получили патент. Но, к сожалению, из российских производителей только один купил лицензию на производство, а все остальные продолжают «пылить» на строительной площадке. Так вот, при использовании 3D-печати вопросов, связанных с работой в пыли, вообще не будет. В итоге профессия строителя станет привлекательнее, и не потребуются привлечения на стройку огромного количества неквалифицированных рабочих, что резко снизит миграцию. Таким образом, к решению большого количества организационно-технических проблем и экономическому эффекту от использования в строительстве аддитивных технологий добавляются положительные социальные аспекты.

Бетоны для 3D-печати и вообще новые стройматериалы будут в ту или иную сторону отличаться от обычных материалов по экологическим параметрам?

Будут, и в лучшую сторону. О снижении пылеобразования на стройплощадке мы уже говорили, но необходимо упомянуть еще один важный момент – использование отходов производства и сжигание мусора. Более того, здесь появляются широкие возможности использования местных отходов. Сейчас мы с индийскими партнерами планируем запустить проект с использованием местных материалов на основе рисовой шелухи и других отходов, коих образуется огромное количество. Вот вам большая экологическая составляющая! Можно использовать отходы пищевого производства, самые разные промышленные и строительные отходы – здесь перед нами открываются очень широкие возможности! И выбросы углекислого газа будут ниже. Например, для НАСА мы разрабатывали геоплимерную версию материала для 3D-печати с нулевым выбросом CO₂. Берется природный материал – например, грунт, к нему добавляется затворитель (это не цементное вяжущее, а активатор, образующий каменное тело при взаимодействии с минеральными компонентами материала для печати), затем из этого материала возводятся и несущие, и ограждающие конструкции здания.

Так что с точки зрения экологии перспективы здесь широкие.

Насколько МГСУ готов обеспечить необходимое количество будущих специалистов для строек страны, для других вузов и для колледжей?

Я бы этот вопрос сформулировал по-другому: мы должны его обеспечить! В утвердительном порядке. МГСУ является флагманом развития строительной отрасли страны, а значит, из его стен должны исходить все передовые идеи. Не со стройки должны приходить сюда и говорить: «Вот есть новая технология, берите на вооружение!» А преподаватель: «О, какая интересная технология, давайте я статью напишу об этом!» Нет, это преподаватель должен первым узнать, разработать и выдвинуть новую идею – отсюда все должно исходить! То же касается информационного моделирования и других полезных инноваций – они должны выходить из стен университета готовыми к практическому применению на строительной площадке.

Для достижения этих целей вы сотрудничаете с российскими вендорами?

Да. Такое сотрудничество началось уже давно. У нас была масштабная идея, в 2016 году мы пригласили многих вендоров и договорились, что МГСУ не будет продвигать только какого-то одного из них и готов всем обеспечить выход на образовательные площадки, а студенты сами будут выбирать, чему им обучаться – ведь они знают, в каких организациях применяется тот или иной программный продукт. Тогда уже был широкий спектр разработок для различных направлений. Но встал вопрос: а кто будет преподавать? Преподаватели еще не были подготовлены – это было совсем новая дисциплина. Тогда мы командировали группу преподавателей поработать с этими вендорами. Получив там знания о программных продуктах и пользовательские навыки, эти преподаватели стали транслировать знания дальше – студентам. Это большой труд, большая работа. Сейчас практически то же самое пытаются сделать, только уже с нашими вендорами.



Олег Кабанцев,
директор дирекции
научно-технических проектов МГСУ,
д.т.н., профессор

Олег Васильевич, вы занимаетесь исследованиями в области методов расчета для строительных конструкций, выполненных с использованием 3D-печати. Расскажите, пожалуйста, о целях этих исследований.

Если вы посмотрите и проанализируете все то, что опубликовано на сегодняшний день, то увидите, что эти публикации можно оценить следующим образом. Это уровень Витрувия, это 10 книг о зодчестве, где нет ни одной расчетной формулы, а есть только некоторые обязательные или рекомендуемые соотношения между сторонами элемента конструкции, между высотой и сечением и так далее. О чем это говорит? О том, что и сейчас, как во времена Витрувия, в этой области практически отсутствуют методы расчета. А расчет является основным инструментом, которым я могу обосновать надежность и эксплуатационную пригодность конструкции, которую выполняю. Так вот, в этом направлении сделаны только первые шаги. В частности, Андрей Петрович Пустовгар организовал целый цикл исследований на эту тему, я тоже провел ряд исследований. Они нужны были для разработки методов расчета конструкции из бетона с некоторыми элементами армирования. Задача состояла в том, чтобы этот расчет можно было выполнять любыми методами: аналитическими, численными и тому подобными.

В чем причина необходимости разработки специальных методов расчета?

Причина очевидна: стандартный бетон – это конструкция, которая уплотняется (есть целая процедура уплотнения бетона). И даже когда мы испытываем бетон – те знаменитые кубики, призмы, цилиндры, – там присутствует процедура уплотнения. Но не надо путать: есть так называемые бетоны, которые не требуются уплотнять. Это отдельный класс бетонов, но это все равно некое монолитное тело, у которого есть, так сказать, фигура – некое начало, границы и финальная точка. И все это внутри заполнено бетоном, в том числе без вибрирования. Это исключительные случаи, но в массе своей процедура уплотнения является основополагающей, потому что бетон, который укладывается хоть небольшими, локальными объемами, хоть большими, все равно нужно уплотнить – удалить некоторые неплотности и сформировать единую монолитную конструкцию. Для этого существуют такие технологические процедуры, как вибрирование разного типа – механическое, ультразвуковое, ударное – какое угодно. Но цель у всех одна – создать монолитную массу. А в рамках 3D-печати все по-другому: здесь взаимодействующие друг с другом определенным образом слои. Внутри слоя мы можем достичь определенного однообразия, потому что ультразвуковое вибрирование тоже позволяет нам создать однородную массу внутри слоя.

Укладка бетона при традиционном строительстве так же производится слоями. Учитываются ли особенности характеристик зон контакта слоев при традиционном устройстве монолитных конструкций? И в чем заключается специфика этого процесса при 3D-печати?

Условия взаимодействия слоев специфические. Есть так называемая математическая модель бетона для одноосного растяжения и сжатия, для двухосного напряжения и для трехосного напряженного состояния. Все эти модели построены для уплотненного бетона. Следовательно, если мы сталкиваемся с другой формой бетона или бетонной конструкцией, выполненной без применения уплотнения, с другими параметрами – мы это



должны учитывать. Я здесь не открою Америку – некоторые расчетные модели в рамках контакта слоев бетонирования существуют давно. Ведь то же бетонирование ведется с первого и до последнего, например, тридцатого этажа – здесь тоже существуют границы. Эти граничные слои тоже описаны – только с учетом того, что их пересекают арматура и прочие элементы. И это говорит нам о необходимости учета специфических условий на границе двух объемов монолита. Вот у нас есть один слой монолита – это один слой, второй – это второй, и так далее. И существует описание (математическое) особенностей бетона зоны контакта слоев. Но следует учитывать тот факт, что зон контакта слоев в традиционной монолитной конструкции очень мало (по отношению к общему объему бетона), что требует учета специфических характеристик зон контакта при локальных расчетах узлов контакта. А в случае с технологией 3D-печати зоны контакта слоев «пронизывают» всю конструкцию, что влияет на (изменяет) обобщенные механические характеристики бетона конструкции в целом.

А дальше?

Когда разные группы ученых провели исследования, выяснилось, что разрушение этих образцов, форма и характер разрушения однозначно связаны с контактными слоями. Но уже проведенные исследования позволяют установить специфические характеристики этих условий взаимодействия. Поэтому мы можем сформулировать понятие констант материала, и эти константы, связанные с взаимодействием разных слоев, уже вводятся нами в метод расчета конструкции. Осталось только понять, насколько полученные результаты универсальны, какова их представительность, какова обеспеченность и т.д. Это большой объем работы, но в целом мы уже хорошо понимаем, с каким явлением сталкиваемся. Следовательно, мы можем адаптировать модель бетона, которую сегодня используем для расчетов, к условиям этой технологии. Я уже понимаю, какие точки графика «напряжения-деформации» нужно скорректировать с учетом полученных результатов,

Технология 3D-печати с применением бетона ближе всех подводит нас к реализации задачи цифровой трансформации строительства

какие углы наклона прямых участков графика надо отредактировать, как нужно отредактировать характеристические касательные к кривым участкам графика. Дальше надо все это написать.

Сегодня мы как раз находимся на этом этапе и в ближайшее время будем публиковать работу по адаптации моделей бетона для конструкций, выполненных с применением технологии 3D-печати. Это совершенно новое дело, по которому публикаций еще не было нигде – ни за рубежом, ни в нашей стране. Это наше передовое направление.

Планируете ли вы продолжить эти исследования и, если да, то в каком направлении?

Это была первая часть, а здесь переходим ко второй. Специфические условия формирования конструкции должны быть отражены и в конструктивных решениях. Очевидно, что с помощью этой технологии хорошо производить несъемную опалубку. Теперь надо понять: если она делается из традиционных мелкозернистых бетонов и у нее есть соответствующий коэффициент теплопроводности, как эта опалубка будет работать в условиях отрицательных температур? Мне, как конструктору, необходимо придумать особые условия печати опалубки, которые бы препятствовали формированию мостиков холода. Это конструктивные решения, нацеленные на то, чтобы не дом строился ради реализации технологии, а технология помогала формировать сооружения с меньшими затратами и с большей эффективностью, то есть она должна быть ориентирована на практическое применение. И это тоже непростая задача. Ту же несъемную опалубку мы делаем с учетом определенных характеристик параметров прочности во взаимодействии между слоями, но они могут быть очень высокими. Допустим, Андрей Петрович Пустовгар

разработает состав, взаимодействие слоев которого превышает прочность самого материала (это абсолютно реальная вещь, такое может быть, и даже стоимость будет приемлемая), но это завтрашний день, а сегодня такого нет. Значит, мне необходимо разработать такие условия формирования самой бетонной конструкции внутри опалубки, чтобы этот бетон своим давлением не сломал эту опалубку. Это тоже конструкторская задача, решение которой должно базироваться на результатах научных исследований. Зачем нам нужна опалубка, которая заведомо сломается?

Мы находимся уже не на начальном этапе, где надо было понять, как это делать и из чего печатать. Самое главное – создать материалы, которые позволят реализовать эту технологию. Этот этап мы уже прошли, особенно благодаря работам коллектива под руководством Андрея Петровича. И поскольку эта задача уже хорошо понятна, можно приступать к решению задач другого класса – в частности, к формированию адаптированной модели бетона. После этого – к конструктивным решениям, а затем уже подходить к пониманию того, как разрабатывать сами конструкции (не вполне ожидаемые). Например, горизонтальные конструкции. Потому что всем понятно, что вертикальные конструкции хорошо печатаются, а как делать горизонтальные, пока не очень понятно. Попытки есть, и их много, но они не столь технологичны, чтобы все сразу поняли – вот оно! И начали бы их применять.

Стройка XXI века – априори высокотехнологичное производство. Насколько описываемые вами процессы пересекаются и взаимосвязаны с другими инновационными технологиями?

Сейчас повсюду начинают массово применять так называемые информационные модели (ИМ). Это уже целое

направление – в строительстве и не только. В этой области уже есть отечественные разработки. Мне все это очень близко, поскольку я занимаюсь такими вещами много лет – с тех пор, как только они появились. В моем багаже на эту тему много докладов, проведенных конференций и т.п. У нас уже сейчас есть разработки, технологичность которых мне понятна. Но не все понимают, что, создав ИМ, дальше я ее, как математическую модель, в производство не передаю. Я могу передать нечто в виде электронного чертежа, но не то, что называется исполнительными командами оборудованию. А есть прямой аналог – например, станки, – когда деталь разрабатывается в рамках математических моделей. Модель определенным образом трансформируется в команды станка, и станок, выполняя систему команд, производит эту вещь. Это – одна из самых сильных сторон всей нашей автоматизации или цифровизации, но еще не все это видят. А самым перспективным, на мой взгляд, путем связи между информационной моделью и производством как раз и является этот условный станок, который мы называем принтер, с тем же аппаратом управления, который точно выполняет команды, формирующиеся на основе информационной модели. Я беру информационную модель, элементарными преобразованиями готовлю команды по формированию слоев с углами поворота, с подъемом на следующий ярус, с обратным ходом головки, с чем угодно. Потому что информационная модель дает исчерпывающие данные. Дальше я только прилагаю свое технологическое понимание, но это заканчивается управляющим кодом. Он напрямую загружается в принтер, и тот начинает из всех сил изображать из себя рабочего, выполняющего задание руководителя. Интереснейшая вещь! Используя общую методику формирования модели, я могу нарисовать любой дом, любую конструкцию, но технологически основа одна и та же. И эта единая основа позволяет мне сформировать для принтера, как для инструмента, команды для создания абсолютно любой конструкции. Ему все равно, какую, просто надо получить команду и сформировать эту конструкцию. Таким образом, технология 3D-печати

с применением бетона (или аддитивная технология) ближе всех подводит нас к реализации задачи цифровой трансформации строительства. Там много хороших сторон – например, разнообразие архитектурных форм. Ведь меня ничто не сдерживает, я могу творить на единой технологической основе: бетон, его характеристики, инструментарий по созданию из этого бетона какого-то изделия – и потом только фантазия архитектора. Круглая стена, квадратная стена, что-то еще по эллипсу... Вот в чем перспектива!

Будем печатать любое здание? Скажем, любой завод?

Любое. У нас остаются вопросы применимости технологии для неудобных конструкций. Это, например, горизонтальные перекрытия. Пока не найдена приемлемая технологическая форма. Конечно, умные головы над этим работают и обязательно решат эту проблему. И наша адаптированная математическая модель бетона будет тут работать. Потом еще что-то параллельное придумаем. Так что все идет вперед, и это вопрос ближайшего будущего.

Тогда такой вопрос. Наступающая сейчас эра строительной печати уже вызвала к жизни разработку новых специальных видов бетона. Но это не совсем новые материалы, а разновидности все того же бетона. Не приведет ли развитие технологии 3D-печати к изобретению принципиально нового вида строительного материала, не относящегося к бетону?

Я не могу исключить такого, но пока, на мой взгляд, это не актуально. Объясню, почему. Помимо очевидных параметров – прочности и технологичности, бетон обладает еще одним немаловажным свойством – доступностью. Даже не дешевизной, а именно доступностью. Возьмем вяжущее. Казалось бы, мы сейчас можем делать всякие чудеса, в том числе создать вяжущее, которое соединяет бетонные компоненты. Но практика показывает, что доступное вяжущее – и технологически, и экономически, и по исходному материалу – именно цементное. Как только кто-то создаст что-то сопоставимое по доступно-

сти с основным вяжущим – цементом, то в этом вопросе будет прорыв. Но пока это далекая перспектива. А специальные виды бетона – это уже реальность, которую мы видим своими глазами. И это будущее мы создаем своими головами и руками.

Поскольку наш журнал называется «Информационное моделирование», и вопросы внедрения ИМ – сквозная тема наших публикаций, то интересно услышать ваше мнение о связке этих двух инноваций. На наших глазах информационное моделирование развивается во всем мире как мощное направление. И точно так же сейчас развивается 3D-печать. XXI век стал началом эры и того, и другого. Эти две интереснейшие новейшие технологии развиваются параллельно и пересекаются просто потому, что не могут не пересекаться? Или есть какая-то взаимосвязь между появлением информационного моделирования и 3D-печати в строительстве?

Связи в их появлении, я полагаю, нет, но это очень удачное совпадение. Это то, о чем можно сказать: я и хотел бы что-нибудь получше, да не придумаю. Это отличное сочетание! С возможностями 3D-печати совпадают ключевые возможности информационного моделирования, которыми, кстати, еще мало кто пользуется. Я знаю, что из себя представляет и из чего состоит информационная модель, потому что работал на самых первых программных продуктах. Так вот повторяю: этими возможностями еще почти не пользуются. Невозможно ими интересоваться в рамках традиционной технологии изготовления конструкций. Она этого не подразумевает. Конечно, отдельные примеры есть – например, при производстве каких-то конкретных изделий. Но пока не будет явно виден внушающий доверие результат использования определенного параметра в информационной модели, эти возможности будут мало кому интересны. Продемонстрируйте конкретную выгоду от использования ИМ, и вы увидите, как быстро начнет распространяться ее применение!

Беседовал
Анатолий Биченов