

В. А. ГАРБЕР, д. т. н.;  
Н. Н. СИМОНОВ, к. т. н.;  
А. А. КАШКО, к. ф.-м. н.;  
Д. В. ПАНФИЛОВ, к. т. н.  
(Филиал АО «ЦНИИС»

НИЦ «Тоннели и метрополитены»)

## ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТОННЕЛЕСТРОЕНИИ

*На сегодняшний день информационное моделирование применяется преимущественно в промышленном и гражданском строительстве. Организация жизненного цикла проектов транспортного строительства имеет схожие признаки и допускает теоретическую возможность для внедрения и сопровождения BIM-технологий применительно к таким сооружениям, как тоннели. В статье представлены основные положения разработки системы тоннельного информационного моделирования (Tunnel Information Modeling — TIM), в которую BIM-технология должна войти как составная часть.*

Концепция BIM (Building Information Modeling) в США и Европе развивается с 1970 года. В нашей стране есть свой конструктив — концепция цифровых моделей объекта (ЦМО) и технологических линий автоматизированного проектирования, создание которой датируется 1977 годом.

В декабре 2014 года Правительством РФ был утвержден план поэтапного внедрения технологий информационного моделирования в области промышленного и гражданского строительства, формируются соответствующие национальные стандарты (нормативная база). Сначала использование концепции BIM носило рекомендательный характер, однако с 1 января 2019 года в силу вступило законодательное предписание.

У информационного моделирования много преимуществ: от ускорения проектных работ и строительства до экономии средств. Прежде всего, в формате 3D создается удобная визуализация проекта, который можно рассмотреть со всех сторон. При этом вносимые в него правки не будут вызывать удорожания пресектных работ и увеличения сроков их выполнения, поскольку BIM позволяет автоматически отследить цепочку изменений во всех разделах и опе-

ративно внести их. Еще одно преимущество технологии — высокое качество проектной документации, получаемое за счет автоматических проверок и устранения незначительных нестыковок.

### Зарубежный опыт и российская ситуация

Строительная отрасль массово переходит на цифровые технологии в глобальном масштабе. Так, Великобритания уже с 1 апреля 2016 года перешла на стандарты BIM. К государственным тендерам допускаются только подрядчики, внедрившие соответствующие технологии. Во многом это стало возможно благодаря тому, что все игроки рынка — не только регуляторы, но и строительно-подрядные организации — активно участвовали в процессе разработки стандартов и критериев BIM. Предпосылкой послужила возможность сэкономить до 20% необязательных затрат на каждом проекте и способствовать дальнейшим инновациям.

Великобритания — не единственная страна, которая взяла курс на обязательность использования BIM. Аналогичные решения приняты в Испании. Там все проекты в гос-

секторе должны реализовываться с использованием BIM с 2018 года. Многие страны и муниципалитеты на сегодняшний день также решили, не «изобретая велосипед», двигаться по британскому пути. Например, Франция, Германия, Дубай (ОАЭ).

BIM применяется в Великобритании, в частности, в рамках проектирования транспортных объектов. Так, недавно с использованием BIM была построена объездная дорога в Рочестере. В результате удалось существенно снизить риски и повысить эффективность работ. Для моделирования использовались фотограмметрические технологии и лазерное сканирование. Они позволяют, в том числе, оптимизировать конструкцию моста или выверить модели тоннелей.

Здесь следует вспомнить создаваемую в агломерации Лондона систему скоростного железнодорожного сообщения Crossrail, которую сегодня называют крупнейшим проектом транспортного строительства в Европе. В рамках его разработки сначала делались как раз лазерные сканы реальных тоннелей, которые потом перенесли на «цифровые рельсы» с миллиметровой точностью.

В целом же в ходе проектирования Crossrail уже сгенерировано большое количество BIM- и САПР-моделей для 650 тыс. объектов. В единой среде работает около 10 тыс. человек. Заказчик считает, что, несмотря на такое количество задействованного персонала, это хорошая возможность снижения затрат и повышения управляемости в проекте. К единому источнику информации имеют доступ все: от инженеров до юристов, финансистов, подрядчиков и логистов. В результате удалось уже на \$13 млн сократить объемы дополнительных расходов и избежать серьезных ошибок.

Пока в Великобритании реализуют проекты уже национального масштаба, в России нормативные акты использования BIM только прорабатываются.

Стандартная методология проектирования объектов дорожного строительства предписывает начать процесс со сбора данных непосредственно с площадки. Речь идет о геологических изысканиях, лазерном сканировании, аэрофотосъемке и т. д. Это, в частности, позволяет выявить имеющиеся на строительной площадке коммуникации и учесть их в ходе проектирования с упором на действующие регламенты и нормы.

Для создания BIM (ТИМ) нужна база действующих регламентов и норм (сортаменты, типы конструкций и т. п.) на государственном уровне.

Концепция единой рабочей среды позволяет учесть все особенности будущего объекта и даже спрогнозировать возможные последствия недоучета проектных изменений. Аналогично решаются все вопросы, связанные с документооборотом, договорными отношениями и бюджетированием.

Таким образом, BIM — это система, основанная на единой базе данных, с которой одновременно работают различные специалисты и информация из которой отображается с помощью активной 3D-графики.

В основе должна лежать база данных, формируемая по отечественным нормам.

В последующем спроектированная единая модель объекта может быть связана с системой автоматизированного управления компьютеризированной строительной техникой. Это делается для минимизации рисков возникновения ошибок на площадке, сокращения времени простоя оборудования, контроля качества. А добавив возможность работы с мобильных устройств и

передачи данных с удаленных датчиков на стройплощадке в диспетчерский пункт, получаем возможность обмена информацией между всеми этапами строительства и оперативного решения возникающих проблем.

## Принципы информационного моделирования транспортных сооружений

Создание информационной модели транспортного сооружения основано на следующих принципах:

1) инфраструктурный принцип, который объединяет этапы пространственного развития территории, учитывая при этом не только ее наземные, но и подземные особенности (грунтовые условия, подземные сооружения, инженерные сети), с решением конкретных прикладных задач для повышения функциональной ценности и потребительских качеств сооружения;

2) принцип замкнутого цикла, который характеризует период существования объекта (рис. 1);

3) экономический принцип, определяющий долгосрочное планирование при оценке затрат, то есть эффективность проекта в долгосрочной перспективе за счет рационального использования отводимых под возводимое сооружение территорий. (См.: Антоноук А. А., Чижов С. В. «Принципы информационного моделирования транспортных сооружений».)

В зависимости от сложности (уникальности) объекта и способов разработки, накопления и обработки данных формируется информационная модель, используемая специалистами на определенных этапах жизненного цикла здания или сооружения.

Особенности BIM-модели строительного объекта:

- модель полностью отображает структуру жизненного цикла для соответствующего здания (сооружения);
- в состав модели включается определенное количество информации, которое определяется действующей нормативной базой по строительству и является обязательной по отношению к рассматриваемому объекту;
- результаты накопления и обработки данных (база данных) на определенном этапе жизненного цикла объекта строительства являются исходной информацией для принятия решений по объекту для последующих этапов, связанных с его эксплуатацией, реконструкцией и утилизацией.

Основной особенностью технологии информационной модели является возмож-

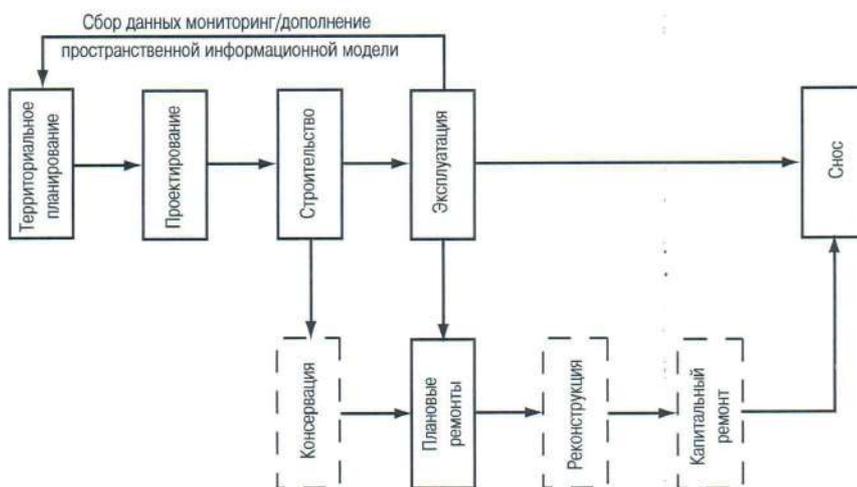


Рис. 1. Жизненный цикл строительного объекта: обязательные и (пунктиром) возможные периоды

ность управлять стоимостью, безопасностью и надежностью сооружения в интерактивном режиме.

### Препятствия для BIM в транспортном строительстве

К настоящему времени BIM-технологии не только показали свою состоятельность на практике, но и стали предметом обсуждения на государственном уровне именно в качестве инновационного метода для эволюционного развития строительной отрасли.

Вместе с тем адаптация и широкое внедрение BIM в транспортном строительстве сдерживается рядом факторов.

К числу объективных факторов можно отнести:

- отсутствие современных программных отечественных продуктов, позволяющих интегрировать информационные модели с системами спутникового позиционирования;

- несоответствие нормативной базы для внедрения BIM-технологий в практику изысканий, проектирования и строительства транспортных сооружений;

- отсутствие отечественных баз данных по строительным конструкциям, нормам и правилам, необходимых для внедрения BIM-технологий;

- отсутствие отечественных средств разработки необходимых баз данных;
- существенно меньшее число участников и объем рынка транспортного строительства, по сравнению, например, с промышленным или гражданским строительством;

- инерция со стороны участников строительного процесса в эффективном освоении возможностей организационного, аппаратного и программного обеспечения;

- неготовность государственных регуляторных органов к законодательному (процедурному) сопровождению BIM-технологии.

К числу субъективных факторов можно отнести определенный разрыв в квалификации и качестве информационного взаимодействия между группами специалистов BIM-технологии, которые инициировали процесс ее внедрения и постоянно совершенствуют практические навыки, и участниками строительного процесса, которые только приступают к ее практическому освоению.

Таким образом, сфера транспортного строительства не обеспечена полным, для всех этапов жизненного цикла объекта, технологическим сопровождением в виде современного отраслевого варианта BIM.

### TIM и BIM

Tunnel Information Modeling, TIM — это информационная трехмерная (3D) цифровая модель проектирования, строительства и эксплуатации тоннельного объекта. Речь идет о сложно организованной базе данных, информация из которой представляется, анализируется и изменяется с использованием 3D-графики.

Не надо путать TIM с недавно появившимся в России термином «ТИМ» (технология информационного моделирования). Последний в настоящее время используется в программе «Цифровая экономика», которая была разработана Минкомсвязью и в июле 2017 года утверждена Правительством РФ.

Основное отличие TIM от BIM состоит в том, что цифровое моделирование осуществляется не для единичного наземного объекта (здание, сооружение, комплекс), а для протяженного непрерывного тоннельного объекта с изменяющимися вдоль него характеристиками. Фактически речь идет о геотехнической системе «грунтовый массив — тоннельный объект — наземное соору-

жение, находящееся в зоне строительства подземного объекта».

К настоящему моменту времени усилия специалистов, привлекаемых к данному процессу цифровизации, сводятся только к адаптации разработанных универсальных программных комплексов для решения прикладных, специализированных задач транспортного строительства.

В табл. 1 приведен возможный вариант последовательности осуществления инфраструктурного проектирования тоннельного сооружения ([www.autodesk.ru](http://www.autodesk.ru)).

### Состояние разработки TIM-моделей

НИЦ «Тоннели и метрополитены» АО «ЦНИИС», начиная с 1995 года, осуществляет работы по обеспечению эксплуатационной безопасности действующих объектов Московского метрополитена, находящихся в зоне нового строительства. Производятся геотехнические расчеты систем «породный массив — подземное тоннельное сооруже-

Таблица 1.  
Вариант инфраструктурного проектирования тоннельного сооружения

Наименование этапа (периода) жизненного цикла	Тип данных	Вид представления
<b>Эскизное проектирование (предпроектное предложение):</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ формирование исходной цифровой модели местности, включая существующую инфраструктуру;</li> <li>■ визуализация концепции (модели)</li> </ul>	Архивная документация; база данных	Графический (2D/3D) / текстовый
<b>Строительные изыскания:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ формирование цифровой модели строительной площадки в рамках локальной геоинформационной системы</li> </ul>	То же + геодезические, геофизические данные	Графический (3D, 2D) / текстовый
<b>Проектирование:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ формирование трехмерной твердотельной модели;</li> <li>■ формирование грунтового основания;</li> <li>■ разработка расчетной, конечноэлементной модели;</li> <li>■ определение параметров напряженно-деформированного состояния;</li> <li>■ конструирование элементов сооружения;</li> <li>■ экспертиза проектных решений;</li> <li>■ визуальное представление конечного результата</li> </ul>	То же + расчетные данные	Графический (3D, 2D) / текстовый
<b>Строительство:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ формирование организационно-технологической последовательности строительных процессов;</li> <li>■ контроль и управление строительным производством;</li> <li>■ экспертиза качества выполнения строительных процессов</li> </ul>	То же + проектные данные	Графический (3D/2D) / текстовый
<b>Эксплуатация:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ экспертиза параметров фактического (технического) состояния;</li> <li>■ показатели надежности и эффективности эксплуатации</li> </ul>	То же	Графический (3D, 2D) / текстовый

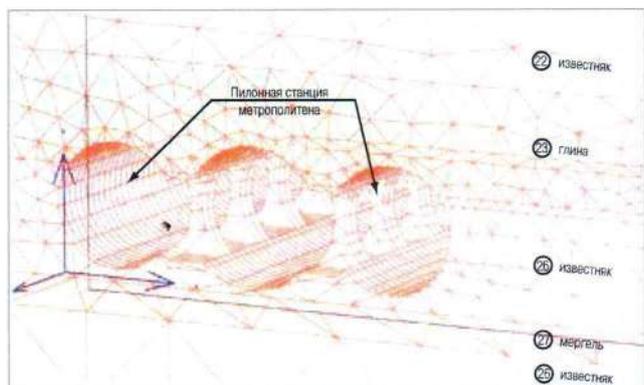


Рис. 2. Математическая модель пилонной станции метрополитена глубокого заложения

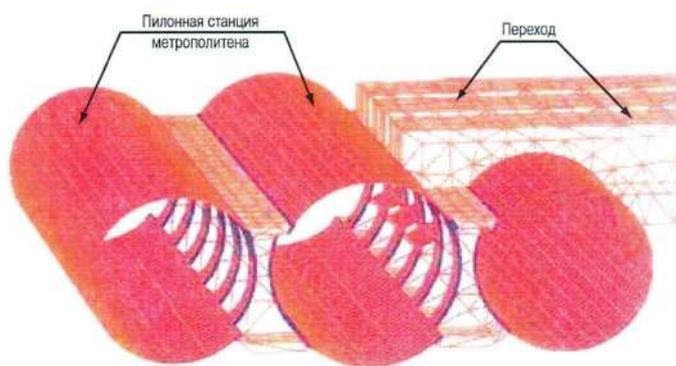


Рис. 3. Математическая модель пилонной станции метрополитена с пешеходным переходом на другую линию

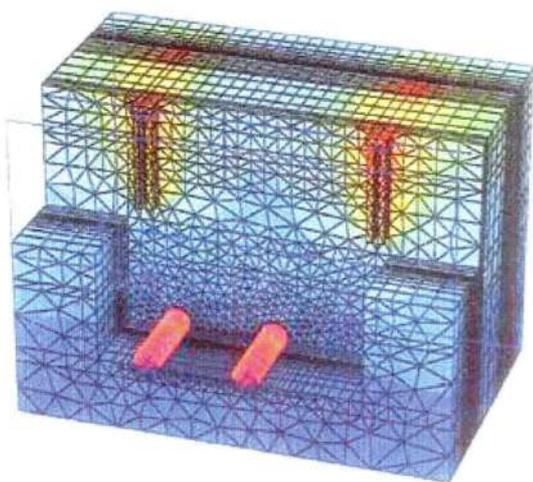


Рис. 4. Математическая модель тоннелей метрополитена в зоне строительства эстакады ТТК в Москве

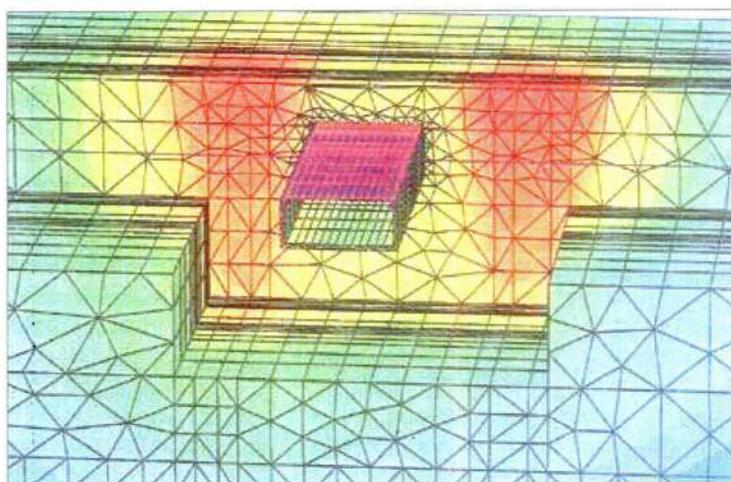


Рис. 5. Математическая модель подземного пешеходного перехода

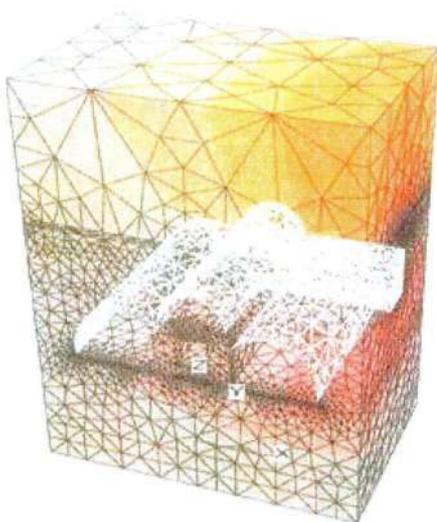


Рис. 7. Фрагмент математической модели двух параллельных тоннелей с камерой водоотливной установки между ними

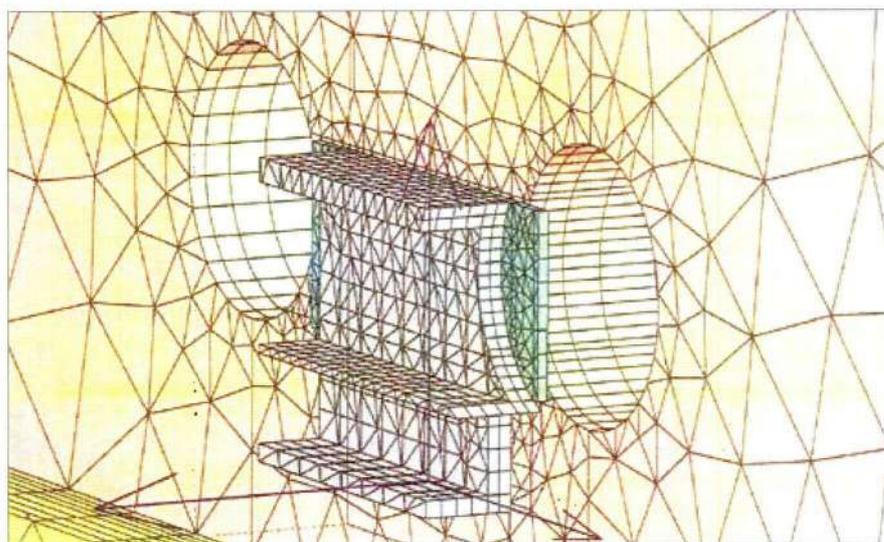


Рис. 8. Математическая модель наклонного (эскалаторного) тоннеля, примыкающего к горизонтальному тоннелю глубокого заложения

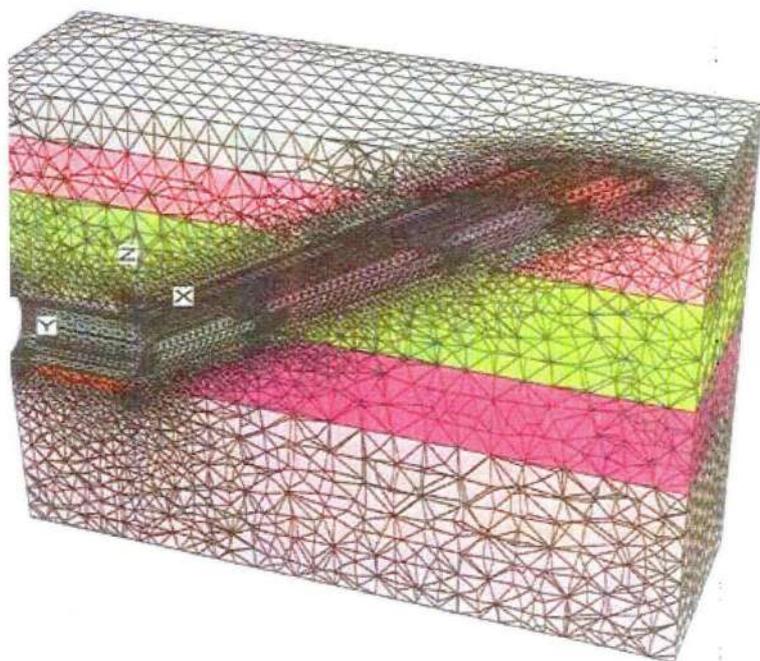


Рис. 6. Математическая модель станции метрополитена глубокого заложения колонного типа с подземным переходом

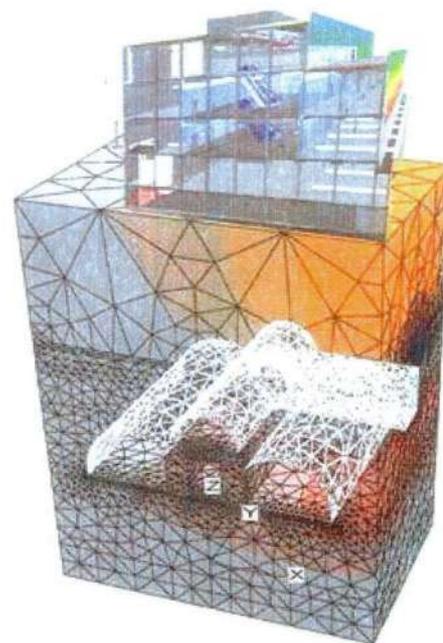


Рис. 9. Гипотетическая ТИМ-модель системы «породный массив — подземное сооружение — наземный объект»

ние метрополитена — возводимые наземные объекты городской инфраструктуры».

За 23 года было осуществлено цифровое моделирование около 400 объектов. Использовались программные комплексы Plaxis, FLAC3D, Z-Soil.

Большинство геотехнических расчетов осуществлялись в плоской постановке (2D), поскольку в этих случаях для выработки рекомендаций по обеспечению эксплуатационной безопасности сооружений метрополитена достаточно было ориентировочной картины напряженно-деформированного состояния (НДС) тоннельных конструкций.

Однако для отдельных сложных и крупных объектов требовалось более тщательное исследование возникающих напряжений и деформаций в конструкциях тоннелей. Поэтому осуществлялось пространственное (3D) моделирование системы «породный массив — подземное тоннельное сооружение — объект городской инфраструктуры». Указанные модели могут служить отправной точкой для разработки ТИМ.

На рис. 2–8 приведены примеры пространственного (3D) численного моделирования системы «породный массив — уникальный подземный объект». В геотехнических расчетах наземные объекты задавались в виде силового воздействия на породный массив и подземное соору-

жение (без детализации их конструкции). Это обстоятельство объясняется тем, что задачей проектировщиков являлось обеспечение эксплуатационной безопасности только тоннелей метрополитена.

На рисунках приведены расчетные математические модели сложных многосвязных подземных объектов: станции метрополитена глубокого заложения пилонного и колонного типа, наклонный (эскалаторный) тоннель, проходящий через слои грунтового массива с различными физико-механическими характеристиками и различной степенью обводнения.

Показаны также модели объектов более простой (односвязной) конфигурации: перегонные тоннели метрополитена кругового поперечного очертания и подземный пешеходный переход прямоугольного поперечного очертания.

Как видно из этих рисунков, модель включает в себя пространственные конечные элементы вмещающего породного массива и двух-, трехмерные конечные элементы, моделирующие подземную конструкцию (тоннельная и станционная обделка, стены и т. п.).

В дальнейшем для создания ТИМ, возможно, потребуется стыковка математического моделирования подземных объектов с BIM-моделью наземных.

Кроме того, будет необходима детализация конструкций подземных

сооружений с указанием всех значимых физико-технических и экономических характеристик каждого элемента.

Также в составе ТИМ-модели следует отразить реологические свойства грунтового массива, позволяющие учитывать изменение его физико-механических характеристик в зависимости от процесса продвижения забоя (проходки).

Еще одним существенным свойством ТИМ-модели должна быть возможность учитывать нарушения технологии строительства (например, дефекты (пустоты) контактного слоя «грунт-обделка»).

При разработке системы ТИМ следует также учесть многолетний экспериментальный опыт по изучению горного давления к. т. н. Б. Н. Виноградова, который доказал, что осадки дневной поверхности над подземными сооружениями продолжают в течение года после окончания строительства. Это вопрос стабилизации напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива.

На рис. 9 приведена возможная ТИМ-модель системы «породный массив — подземное сооружение — наземный объект».

Следует также отметить важность разработки банка (базы) данных всех существующих транспортных тоннелей, которая станет информационной основой создания ТИМ. Но это — отдельная большая тема. ■