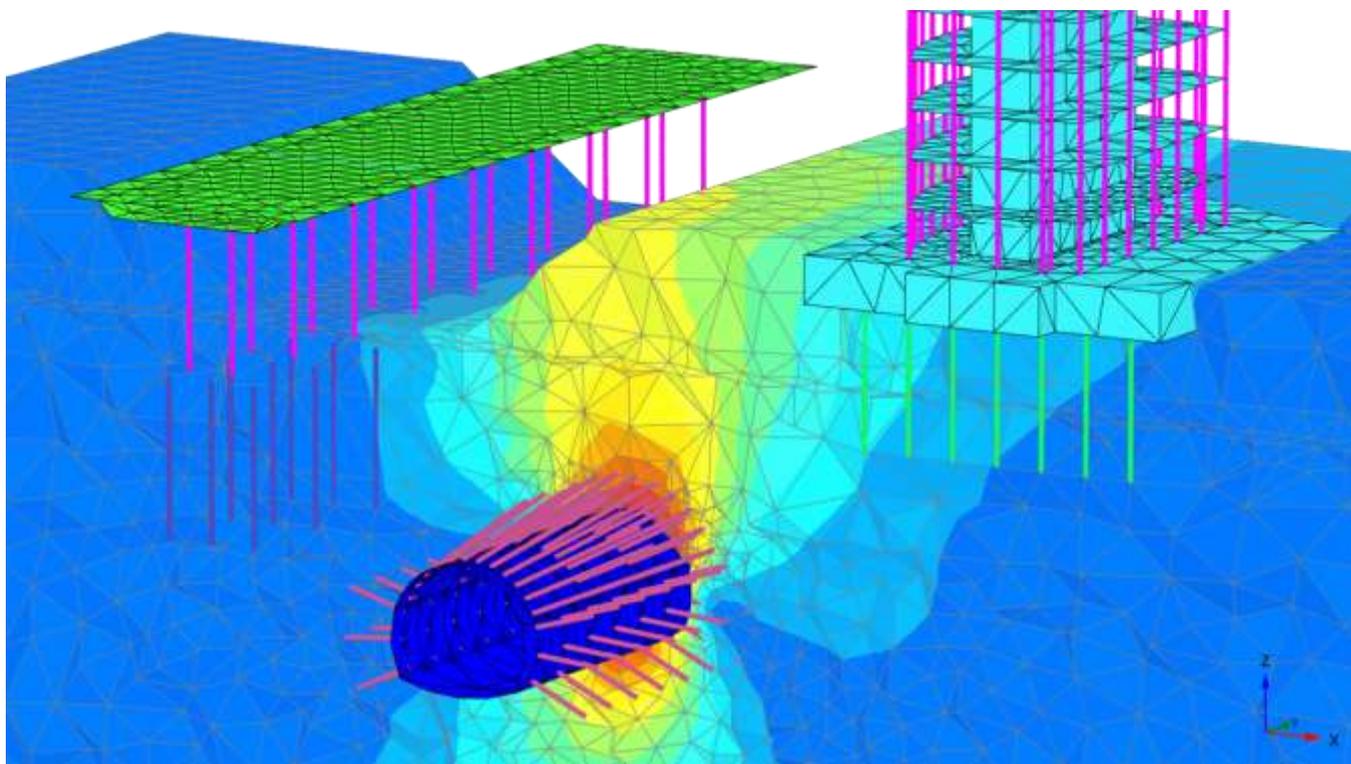


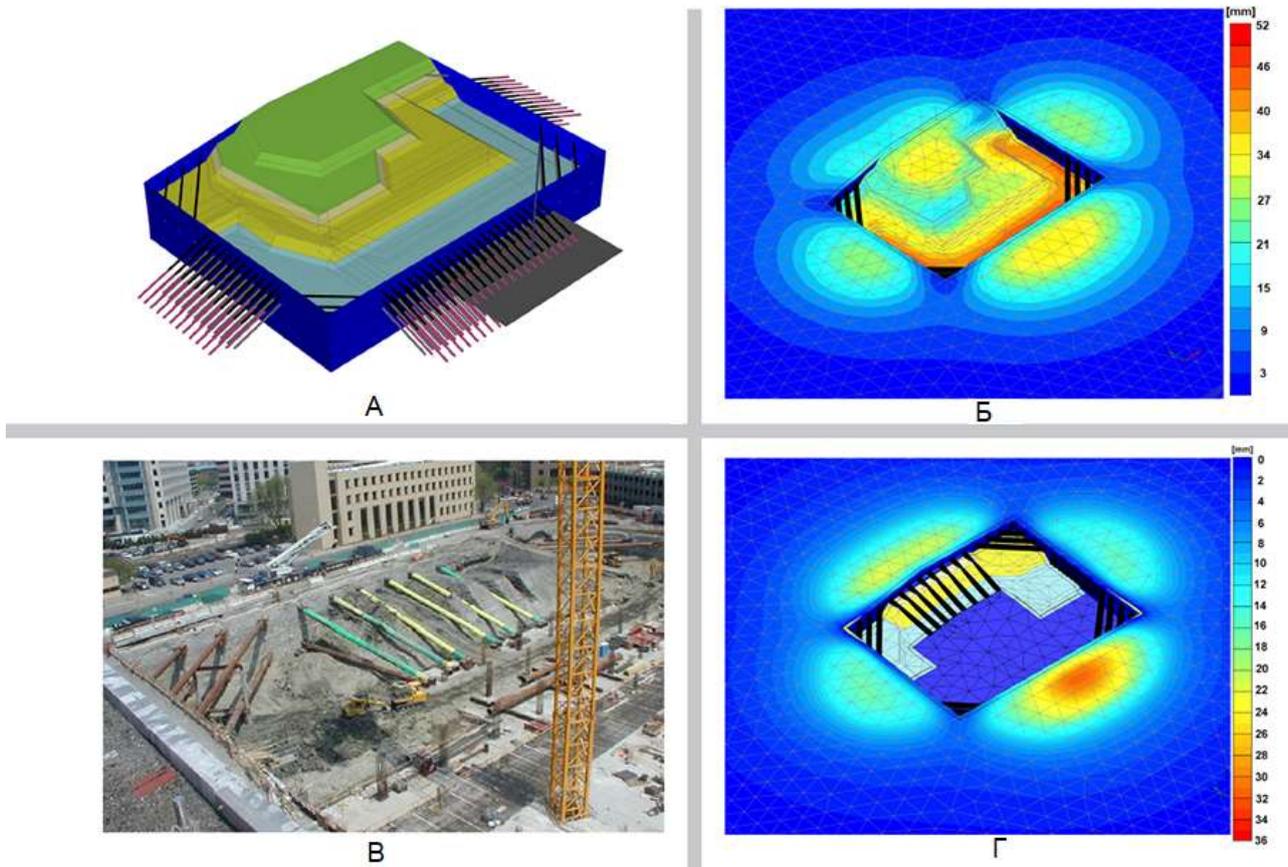
## Численный анализ в геотехническом проектировании: автоматизированный выбор комплексной геомеханической модели и параметров грунта



Предлагаем вниманию читателей обзор материалов статьи Рональда Бринкгреве «Автоматизированная модель и выбор параметров: включение экспертных входных данных в геотехнический анализ» [2]. Эта статья была опубликована в 2019 году в журнале GEOSTRATA, который выпускает Геоинститут Американского общества инженеров-строителей (ASCE). Ее автор является одним из разработчиков конечноэлементного программного комплекса PLAXIS, доцентом Делфтского технологического университета и руководителем отдела научных исследований и новых разработок Экспертно-консультационного центра по геотехнике компании PLAXIS bv (Нидерланды). Его основные научные интересы включают комплексные геомеханические модели грунта и численные методы исследований грунтовых оснований и их взаимодействий с инженерными сооружениями. Статья подготовлена при поддержке компании «НИИ-Информатика» — партнера журнала «ГеоИнфо».

Аналитическая служба  
[info@geoinfo.ru](mailto:info@geoinfo.ru)

Для решения задач о взаимодействии между грунтовым основанием и строительным объектом, для оценки стабильности и расчетов по предельным состояниям численный анализ имеет большие преимущества по сравнению с традиционными методами в отношении уровня детализации и понимания сути происходящих процессов (например, рис. 1).



**Рис. 1.** Выемка грунта для строительства здания «Стата-центр» Массачусетского технологического института в городе Кембридж штата Массачусетс США. Сложная проблема взаимодействий между грунтовым основанием и зданием потребовала использования передовых численных методов и комплексных геомеханических моделей грунта: А – 3D модель промежуточной стадии выемки грунта, выполненная в программном комплексе PLAXIS; Б – расчетные деформации на промежуточной стадии; В – фотография, показывающая промежуточную стадию выемки грунта; Г – расчетные деформации завершающего этапа [2]

Ключевым фактором успеха в численном анализе является правильное определение параметров комплексной геомеханической модели грунта, используемой в конечноэлементном программном обеспечении, на основе доступных, но часто недостаточных данных по грунту. Известно, что когда разные инженеры решают одну и ту же задачу, у них зачастую получаются неодинаковые результаты. В связи с этим возникают вопросы: почему в рамках услуг по геотехническому проектированию до сих пор неохотно используются численные методы и как с этим справиться? Прежде всего, может ли автоматическое определение параметров комплексной геомеханической модели, лежащей в основе численного анализа, сузить диапазон результатов численного моделирования и повысить их достоверность и, соответственно, надежность для геотехнического проектирования? На эти вопросы попытался ответить Рональд Бринкгреве в своей статье «Автоматизированная модель и выбор параметров: включение экспертных входных данных в геотехнический анализ» [2], обзор материалов которой аналитическая служба журнала «Геоинфо» предлагает читателям.

## Об использовании традиционных методов и численного анализа в геотехнике

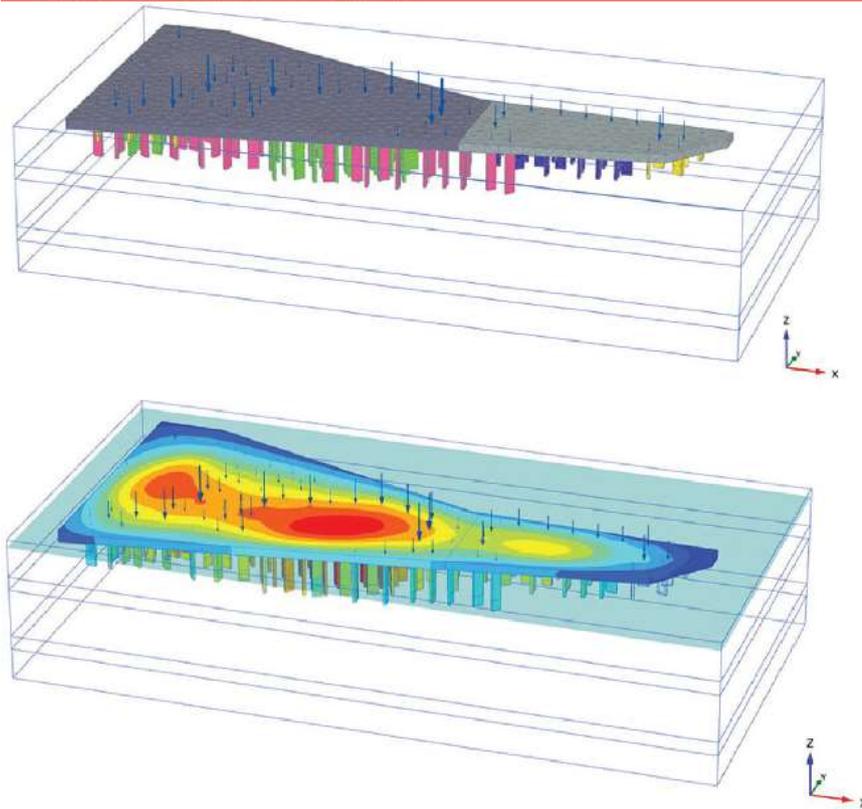
Традиционные методы геотехнического анализа, применяемые в простейших для использования компьютерных программах, существуют более 35 лет. Достаточно простое в применении программное обеспечение для численного анализа, основанное на методе конечных элементов (МКЭ) или на методе конечных разностей, доступно уже в течение 30 лет, но все еще гораздо меньше используется в геотехническом проектировании. При этом за последние три десятка лет численные методы и лежащие в их основе комплексные геомеханические модели непрерывно развивались и в итоге значительно улучшились, тогда как традиционные методы, по существу, остались теми же.

Рональд Бринкгреве [2] выделяет четыре основные причины того, почему геотехники предпочитают использовать старые методы, несмотря на преимущества численного анализа и его успешное применение во многих других дисциплинах:

- 1) ограниченность и неполнота данных по грунту, постоянное развитие и совершенствование методов получения и интерпретации этих данных, неправильное восприятие возможностей современного численного анализа;
- 2) недостаток знаний по фундаментальной механике, используемых в численных методах и комплексных геомеханических моделях (это особенно сильно сказывается в РФ, что связано с последствиями распада СССР. – *Ред.*);
- 3) неправильное представление о том, что численный анализ отнимает больше времени и является более дорогостоящим и при этом менее продуктивным, чем традиционные методы;
- 4) ограниченное понимание результатов численного анализа и неуверенность в них при тестировании программного обеспечения так называемым методом черного ящика (когда функциональность исследуется без рассмотрения кода, деталей реализации и знаний о внутреннем устройстве программы, а только с опорой на требования к ней и на ее спецификацию [4]. – *Ред.*).

В силу этих и некоторых других причин многие представители геотехнических и проектных услуг и руководители проектов упорно продолжают использовать традиционные методы, упуская при этом преимущества численного анализа (если он выполняется правильно), который предоставляет такие возможности, как:

- 1) решение многих инженерных и конструкторских задач в процессе одного расчета;
- 2) более глубокое понимание взаимодействия между грунтом и сооружением;
- 3) реалистичное моделирование сложных ситуаций (например, рис. 2);
- 4) оптимизация проектного решения и др.



**Рис. 2.** Пример модели и результаты трехмерного конечноэлементного анализа сложной системы фундаментов на сваях-бареттах [2]

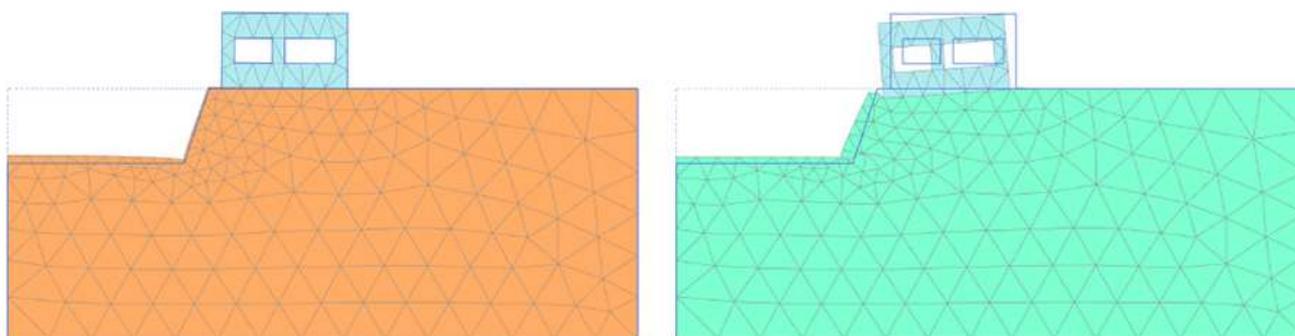
По мнению Бринкгреве [2], численный геотехнический анализ в среде геотехников часто считают слишком сложным главным образом потому, что численные модели требуют определения большего количества параметров, чем традиционные методы.

При численном анализе зависимость деформаций грунтового основания от напряжений моделируется с помощью комплексных геомеханических моделей (КГМ) (под которыми понимается трактовка термина *constitutive models* (конститутивные, или определяющие, модели), т.е. модели, которые одновременно учитывают взаимное влияние жесткости и прочности, а также дополняются различными, в зависимости от модели, возможностями в виде апробированных самостоятельных теорий, например ползучести, дилатансии, повышенной жесткости при малых деформациях и др. – *Ред.*). Эти модели качественно описывают поведение грунта, в то время как их параметры количественно определяют такие конкретные аспекты этого поведения, как жесткость, прочность и др. Здесь Бринкгреве [2] обращает внимание читателей на то, что параметры моделей (например, опорный модуль деформации в формуле, определяющей зависимость жесткости от напряжения) в большинстве случаев (но не всегда) не совпадают с физическими характеристиками грунта (например, с гранулометрическим составом, пористостью, относительной плотностью, влажностью, числом пластичности) или с его механическими параметрами (например, с углом внутреннего трения, прочностью на сдвиг в недренированных условиях). К тому же свойства грунта могут изменяться во времени или при изменениях напряжений и деформаций во время нагружения (например, может происходить дробление частиц грунта), тогда как параметры модели принимаются постоянными. Однако правильный выбор комплексной геомеханической модели и

соответствующих параметров может должным образом учитывать изменения в поведении грунта.

При выполнении численного анализа приходится переходить от использования упрощенных моделей идеального линейно-упругопластического поведения (например, модели Мора – Кулона) к более сложным нелинейным упругопластическим моделям, которые в целом включают больше характеристик поведения грунта и требуют определения большего количества модельных параметров (например, к модели упрочняющегося грунта при малых деформациях – Hardening soil small, или HSS).

Использование слишком простых моделей в основе численного анализа может привести к неверным выводам. Так, на рисунке 3 показано, что разные модели с одной и той же геометрией могут давать сильно различающиеся результаты деформационного поведения (например, широко известна проблема некорректного поведения модели Мора – Кулона в задачах с разгрузкой. – *Ред.*).



**Рис. 3.** Результаты по деформациям, полученные с помощью конечноэлементных моделей с одной и той же геометрией, но использующих разные модели и параметры [2]

Поэтому, как подчеркивает Бринкгреве [2], к выполнению численного анализа надо подходить очень тщательно, с использованием комплексных геомеханических моделей, которые охватывают основные характеристики поведения грунта, необходимые для конкретной задачи (например, на сайте [plaxis.com](http://plaxis.com) в разделе «Статьи» выложены рекомендации разработчиков по выбору моделей как в зависимости от типа грунта, так и в зависимости от типа решаемой задачи. – *Ред.*).

### Об определении параметров модели

Определение параметров комплексной геомеханической модели в идеале должно основываться на данных всесторонних полевых исследований и лабораторных испытаний высококачественных образцов грунта (в нормативной базе РФ требования к качеству образцов впервые появилось в СП 23.13330 в 2018 году. – *Ред.*). В связи с этим необходимо убедить заказчиков и/или владельцев проекта, что затраты на правильно спланированные и проведенные полевые и лабораторные исследования – это инвестиции, которые окупаются (иногда многократно. – *Ред.*) за счет снижения неопределенностей и рисков проекта (здесь Бринкгреве [2] отсылает читателей к своему докладу [3], в котором он привел обзор методов определения параметров для различных комплексных геомеханических моделей).

Надлежащее определение параметров моделей должно выполняться в сочетании с решением прикладных задач (например, определением уровней напряжений, траекторий напряжений, величин деформаций и скорости нагружения), особенно когда используются упрощенные модели грунта. При таком подходе характеристики грунта, отсутствующие в модели, могут до некоторой степени компенсироваться «адаптацией» параметров, но это может быть рискованно (речь идет о возможности использования, например, модели Мора – Кулона, но только для расчета осадки и при выборе модуля деформации в зависимости от соотношения бытовых напряжений и напряжений от сооружения, а кроме того при дополнительном делении слоя грунта на несколько расчетных слоев для адекватного описания сложного поведения грунта простой моделью – но даже в таком случае решение задачи с котлованом будет некорректным. – *Ред.*).

Таким образом, еще одна причина, по которой предпочтительны более совершенные комплексные геомеханические модели, заключается в том, что их параметры, как правило, в меньшей степени зависят от субъективных интерпретаций, выполненных инженерами.

Определение параметров может быть основано на:

- корреляциях с результатами полевых испытаний – динамического зондирования (SPT), статического зондирования (CPT), испытаний плоским дилатометром (DMT) и др.;
- корреляциях с такими показателями физических свойств грунта, как предел текучести и предел пластичности, число пластичности и показатель текучести, относительная плотность и др.;
- результатах лабораторных испытаний (трехосных, одометрических, на прямой простой сдвиг и др.);
- таблицах, графиках, региональных базах данных.

Разные методы зачастую дают разные значения параметров. Их выбор требует знания методик испытаний, их обоснованности, ограничений и пределов. Даже при верном выборе получаемые результаты обычно не являются уникальными и должны быть правильно истолкованы на основе опыта инженера и выполненного им анализа.

Все это делает определение параметров модели действительно достаточно сложным. Соответственно, способность правильно выполнять численное моделирование с использованием наиболее подходящих комплексных геомеханических моделей и с выбором соответствующих параметров требует больших знаний и современного геотехнического опыта. И пока обладающих ими практикующих геотехников довольно мало. Но такие специалисты уже в течение ряда лет используют численные методы и усовершенствованные комплексные геомеханические модели. Они разработали свои собственные рабочие процессы для определения модельных параметров, собрали базы данных с локальными данными и доступные корреляции из литературы, разработали собственные формулы и внедрили их в электронные таблицы и специализированные программные средства. Все это дает им большие конкурентные преимущества в численном моделировании, а значит, и в современном геотехническом проектировании.

Богатым опытом и данными этих специалистов (экспертов) было бы очень полезно и удобно воспользоваться новым (или нечастым) пользователям численных моделей. Такие данные, а также наборы корреляций, их правильные области применения и другие

источники информации вполне могут быть включены в общедоступное программное обеспечение, что окажет неоценимую помощь пользователям в определении параметров моделей. И действительно, некоторые коммерческие программы уже содержат наборы корреляций для определения параметров грунта, но пока нет общедоступного программного обеспечения, которое автоматически определяет модельные параметры для моделей на основе данных инженерных изысканий. К сожалению, как отмечает Бринкгреве [2], пока большинство специалистов почему-то отвергают идею автоматического определения параметров, даже если при правильном применении оно может принести значительную пользу отрасли (здесь стоит отметить работы Владислава Васенина, который движется в указанном направлении. – *Ред.*).

### **О достоверности результатов численного анализа**

Говоря о качестве результатов численного анализа, Бринкгреве [2] снова подчеркивает, что оно в значительной степени зависит от способности пользователя выбрать правильную модель для рассматриваемого применения и необходимые для этого параметры модели.

Сравнения показывают широкий диапазон результатов численного моделирования даже при четком изначальном определении данных по грунту. Эта неопределенность не способствует уверенности специалистов в целесообразности использования численного анализа для целей геотехнического проектирования. Чтобы повысить эту уверенность, используемые численные методы и комплексные геомеханические модели должны быть «прозрачными» (несложными, понятными), результаты их использования должны пройти валидацию, а ширина диапазона неопределенности должна быть сужена.

По мнению Бринкгреве [2], достоверность численных результатов может быть улучшена путем объединения следующих элементов:

- 1) повышения уровня образования в соответствующей сфере, то есть изучения и обучения специалистов в отношении возможностей и ограничений комплексных геомеханических моделей и численных методов, а также способов правильного определения параметров, используемых в моделях;
- 2) наработки опыта в интерпретации определения параметров моделей путем решения опубликованных контрольных задач и применения этого опыта на практике;
- 3) обмена знаниями и опытом среди геотехников в производстве и научных кругах (в РФ здесь стоит отметить выставки «ГеоИнфо ЭКСПО», конференции пользователей PLAXIS и др. – *Ред.*).

Однако, к сожалению, сокрушается Бринкгреве [2], несмотря на десятилетия попыток выполнить эти три вещи с помощью конференций, семинаров, информационных каналов, онлайн-платформ и т.д., использование (зачастую неправильное) численного анализа в геотехническом проектировании пока растет быстрее, чем качество его результатов.

### **Об автоматическом определении параметров**

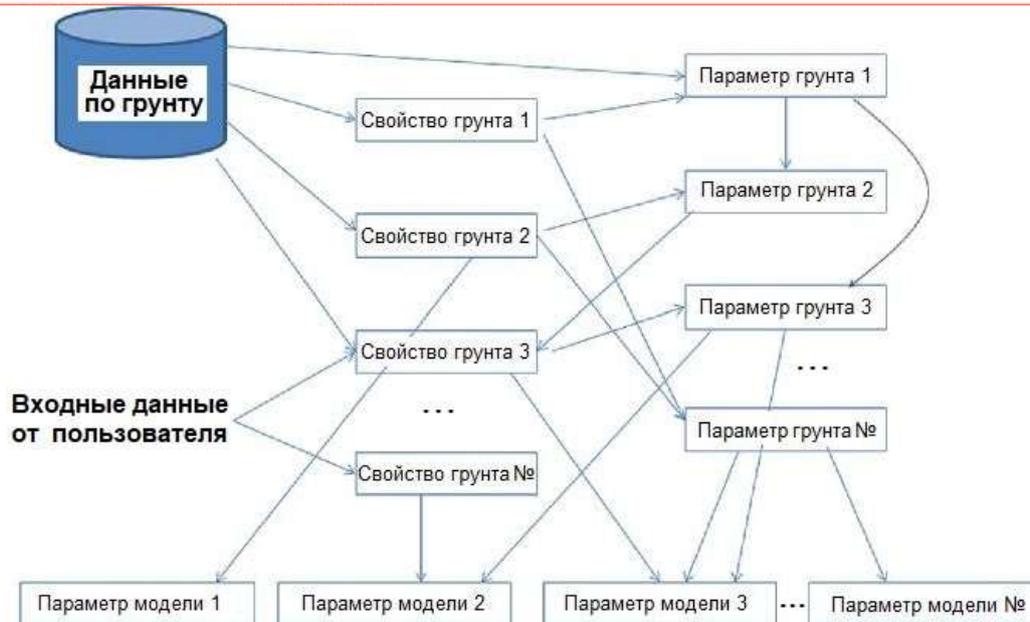
Эффективный способ продвинуться вперед, как считает Бринкгреве [2], – разработать онлайн-инструмент для автоматического определения характеристик и интерпретации

стратиграфии грунтового основания на основе стандартизированных результатов изысканий и последующего автоматического выбора комплексных геомеханических моделей и соответствующих параметров для различных слоев грунта. Основная идея здесь состоит в том, что автоматизация делает определение параметров менее зависимым от пользователя и уменьшает изменчивость результатов, снижая влияние на них человеческого фактора.

Обычной практикой является интерпретация стратиграфии и типа поведения грунтового основания по результатам полевых испытаний (динамических испытаний (SPT) методами Мейерхофа, статических испытаний (CPTu) методами Робертсона и Кампанеллы и др.). Эти данные предоставляют геометрическую информацию о вертикальном и горизонтальном распределении слоев грунта и соответствующих типах его поведения, что может быть автоматизировано. Бринкгреве [2] отмечает, что для численного анализа следует использовать определенную минимальную толщину слоя, чтобы избежать моделирования слишком тонких слоев грунта. Это означает, что до некоторой степени необходимы манипулирование и «усреднение» последних, однако при сохранении влияния слабых слоев.

Автоматизированный выбор подходящей модели грунта должен распознавать и фиксировать основные характеристики поведения грунта для того его типа, который был определен в ходе полевых и, в идеале, лабораторных испытаний хорошего качества. В большинстве случаев выбранная модель будет нелинейной комплексной геомеханической моделью. Однако могут использоваться разные модели, учитывающие зависимости уровней напряжений, траекторий напряжений и деформаций от типов встреченных грунтов или необходимых типов анализа. Например, анализ динамического разжижения илистых слоев грунта может потребовать применения конкретной модели, но это может быть не лучшая модель для анализа статических деформаций.

Для автоматизации выбора параметров модели нужна так называемая *экспертная система* (компьютерная система, способная частично или полностью заменить специалиста в разрешении той или иной проблемной ситуации [5]. – *Ред.*), в которой должны быть использованы все общедоступные знания в требуемой сфере. Эта система должна «знать» пригодность и ограничения используемых корреляций, формул, графиков и таблиц и при этом быть гибкой и расширяемой для возможности включения новой информации. Она должна иметь алгоритм для автоматического создания валидных цепочек корреляций, которые связывают измеренные при полевых испытаниях величины с параметрами модели через промежуточные физические характеристики грунта (например, относительную плотность, число пластичности) и его механические параметры. На рисунке 4 представлена концептуальная схема выбора параметров модели на основе таких цепочек. Каждый блок представляет корреляцию, имеющую один или несколько входных параметров и одно или несколько условий. Результирующее значение параметра может использоваться в другой корреляции.



**Рис. 4.** Схематичное представление процесса автоматического определения параметров модели [2]

Экспертная система должна «уметь» справляться со многими значениями параметров и проверять результаты. После устранения выбросов (экспериментальных величин, резко выделяющихся по сравнению со средней кривой) можно применить статистическую процедуру к оставшимся значениям, чтобы вычислить окончательную величину параметра, которая будет использоваться при анализе. Параметры, определенные таким образом, должны быть репрезентативными для ситуаций со второй группой предельных состояний (по эксплуатационной пригодности), тогда как для первой группы предельных состояний (по потере несущей способности) может применяться метод расчета с частными коэффициентами запаса (в PLAXIS это реализовано в Design Approaches – *Red.*).

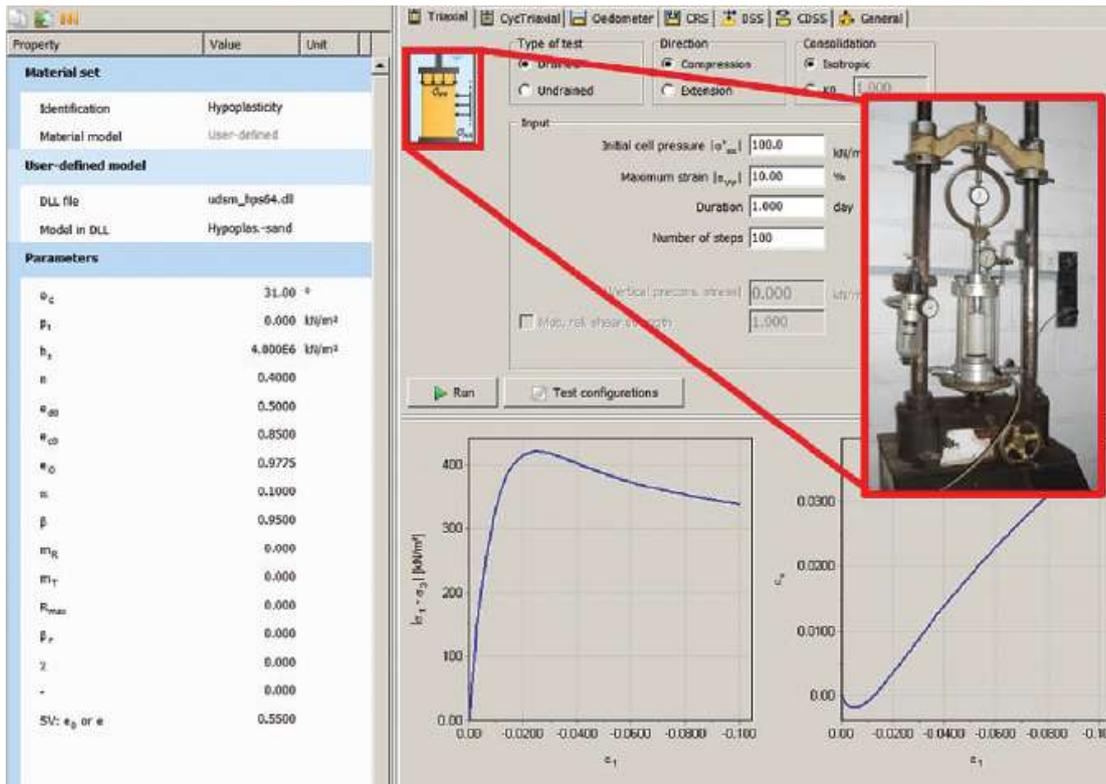
Выполнение вышеперечисленного алгоритма для всех параметров модели и для всех слоев грунта обеспечивает сбор автоматически определенных наборов данных по грунтовому основанию (комплексная геомеханическая модель плюс параметры, представляющие каждый тип грунта), которые можно автоматически назначать соответствующим слоям в численной модели.

Здесь Бринкгреве [2] особо подчеркивает, что *в целом более сложные модели включают больше характеристик поведения грунта, но также требуют определения большего количества параметров модели.*

### Об ответственности и валидации

Хотя автоматический выбор модели и ее параметров должен привести к более достоверным результатам, конечная ответственность за итоги анализа и за геотехническое проектирование, как отмечает Бринкгреве [2], все равно остается за инженером. Это означает, что инженер должен выполнить верификацию и валидацию (см. статью [1]. – *Red.*) автоматически созданных наборов данных по грунтовому основанию. Поэтому процедура автоматического определения параметров должна быть «прозрачной» и верифицируемой.

Валидация поведения грунта, представленного моделью и ее параметрами, может быть выполнена путем моделирования лабораторных испытаний (рис. 5). Полученные таким путем кривые «напряжение – деформация» можно затем сравнить с высококачественными данными лабораторных испытаний, которые в идеале являются частью стандартизированного отчета по инженерным изысканиям на площадке будущего строительства. Это даст представление о точности, с которой реальное поведение грунта аппроксимируется моделью, и о возможностях и ограничениях последней.



**Рис. 5.** Модуль Soil Test программы PLAXIS и традиционный прибор для трехосных испытаний (на врезке) [2]

### Вместо заключения. Над чем работать дальше?

Бринкгреве [2] еще раз отмечает, что сегодня геотехническое проектирование все еще в значительной степени основывается на традиционных методах, которым уже десятилетия. При этом численный анализ продолжает демонстрировать большой потенциал в обеспечении более глубокого понимания общего поведения грунта и в помощи с оптимизацией общего замысла проектирования, поэтому использование численного моделирования в отрасли стало более активно расширяться, однако с риском неправильного применения и неверной интерпретации.

Автоматизированный выбор комплексной геомеханической (конститутивной) модели и параметров грунта может быть предоставлен таким инструментом, как экспертная система, которая поможет уменьшить влияние человеческого фактора и тем самым снизить изменчивость и повысить достоверность результатов численного анализа. Если в

отрасли будут объединены силы, то такую систему удастся создать. И чем больше будет заинтересованных геотехников, желающих принять в этом участие, тем лучше.

## Источники

1. Рональд Бринкгреве о том, что такое численное моделирование (МКЭ) в геотехнике, и о валидации моделей // Geoinfo.ru. 20.02.2020. URL: <https://www.geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/ronald-brinkgreve-o-tom-chto-takoe-chislennoe-modelirovanie-mkeh-v-geotekhnike-i-o-validacii-modelej-42235.shtml>.
2. *Brinkgreve R.B.J.* Automated model and parameter selection: incorporating expert input into geotechnical analyses // GEOSTRATA. Geo-Institute of ASCE, 2019, Vol. 23. № 1. P. 38–45. URL: [http://www.readgeo.com/geostrata/jan\\_feb\\_2019/MobilePagedArticle.action?articleId=1455782#articleId1455782](http://www.readgeo.com/geostrata/jan_feb_2019/MobilePagedArticle.action?articleId=1455782#articleId1455782).
3. *Brinkgreve R.B.J.* Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application // Proceedings of the Geo frontiers conference “Soil constitutive models: evaluation, selection, and calibration” (GSP 128), 24–26 January, 2005, Austin, Texas. ASCE, 2005. Vol. 128. P. 69–98.
4. [quality-lab.ru/blog/key-principles-of-gray-box-testing/](http://quality-lab.ru/blog/key-principles-of-gray-box-testing/).
5. [ru.wikipedia.org/wiki/Экспертная\\_система](http://ru.wikipedia.org/wiki/Экспертная_система).

## Рис. на заставке:

[https://lh3.googleusercontent.com/rnF4GI2yNdpsnv1YZJEKNaiZxvizOjCenQSsQO7ulWZlgP3CIPMd\\_tnCoxNNSNVUjXqoZX4VVBD1hX\\_zQikQdjwoFLAUsoFaxflGKwOn4zhKEfq43QBBb5muFEyG1QO4iYUeKxID](https://lh3.googleusercontent.com/rnF4GI2yNdpsnv1YZJEKNaiZxvizOjCenQSsQO7ulWZlgP3CIPMd_tnCoxNNSNVUjXqoZX4VVBD1hX_zQikQdjwoFLAUsoFaxflGKwOn4zhKEfq43QBBb5muFEyG1QO4iYUeKxID)