

Дисциплина:

**Моделирование и расчёт подземных сооружений
на сейсмическое воздействие**

**Лекция 12. Физическое моделирование динамических
воздействий на подземные сооружения, основные
положения теории подобия.**

ЮШКИН Владимир Федорович

Новосибирск – 2015

Методическая литература к лекции 12

- 1. СП 122.13330.2012.** Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97. – М: Минрегион РФ, 2012. – 117 с.
- 2. СП 14.13330.2011.** Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. – М: Минрегион РФ, 2011. – 84 с.
- 3. ВСН 193-81.** Инструкция по учету сейсмических воздействий при проектировании горных транспортных тоннелей. – М.: Минтранстрой СССР, 1982. – 67 с.
- 5. Дорман И. Я.** Сейсмостойкость транспортных тоннелей. – М.: Информационно-издательский центр ТИМР, 2000. – 307 с.

Лекция 12. **Физическое моделирование динамических воздействий на подземные сооружения, основные положения теории подобия.**

Моделирование как метод исследования широко используют в различных областях современного естествознания и техники: аэромеханике, гидравлике, самолетостроении, различных областях машиностроения, гидротехническом строительстве, геомеханике горном деле и т. д.

Модели - это инженерные представления, которые могут быть материализованы в виде физических моделей или сформулированы математически.

Исходя из этого по принципам, на которых основано моделирование, различают моделирование двух видов: **физическое** и **математическое**.

Физическое моделирование предусматривает воссоздание в физической модели тех же самых или аналогичных физических полей, что действуют в объекте природы, лишь измененных по своим абсолютным значениям в соответствии с масштабом моделирования. Одним из основных преимуществ физического моделирования является возможность осуществления прямых наблюдений за моделируемыми процессами и явлениями, иногда это преимущество является решающим.

В физическом моделировании выделяется **аналоговое моделирование**, которое предусматривает замену в модели по сравнению с натурой одних физических полей другими, например замену натурального поля механических напряжений электрическим полем в модели или замену поля механических напряжений картиной оптической анизотропии в оптически чувствительных прозрачных материалах. Таким образом, на аналоговых моделях изучают закономерности явлений и процессов, протекающих в натуральных объектах, используя математическую аналогию различных по физической природе процессов, т. е. математическую тождественность основных законов, совпадение дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы.

В отличие от физического **математическое моделирование** предусматривает построение некоторых идеализированных схем или математических моделей исследуемых процессов или явлений и их исследование аналитическими методами. Исходя из этого, методы математического моделирования относят к теоретическим методам исследования. **Моделирование в геомеханике и тоннелестроении** получило широкое развитие вследствие ряда объективных обстоятельств.

Как известно, **массив горных пород является весьма сложной средой**, которая к тому же находится **под одновременным воздействием большого числа факторов как естественного, так и техногенного происхождения**.

В результате в различных частях одного и того же участка породного массива при ведении горно-строительных работ одновременно могут происходить процессы деформирования различного характера - процессы упругого деформирования, необратимые пластические деформации, процессы смещений и разрушений пород с разрывом сплошности. Кроме того, в каждой конкретной точке массива имеет место своя конкретная ситуация, своё сочетание действующих факторов и поэтому результаты натурных исследований, как правило, всегда имеют некоторый, иногда весьма существенный разброс, и вследствие этого могут обладать недостаточной общностью. Следует добавить, что в натурных условиях обычно ограничены возможности варьирования параметрами системы, технологией и последовательностью ведения горно-строительных работ, тогда как при моделировании можно проследить влияние основных параметров в самых широких пределах.

Вместе с тем при построении любого вида моделей воспроизводятся только общие, принципиально существенные особенности изучаемых явлений и чётко отбираются действующие факторы, которыми в процессе модельных исследований можно варьировать. Например, применительно к такому объекту, как горные породы, невозможно в полной мере воспроизвести микротрещиноватость и мелкоблоковую трещиноватость, даже при очень крупных масштабах моделирования.

Таким образом, учитывая преимущества и недостатки обоих подходов, можно сказать, что оптимальное сочетание **натурных исследований с моделированием** позволяет всесторонне исследовать изучаемые процессы и явления, выявить как общие закономерности, так и влияние отдельных факторов и при этом существенно **экономить материальные затраты и время**.

Физическое моделирование бывает **двух типов**: с **увеличением** и с **уменьшением масштаба** системы. В геомеханике и тоннелестроении изучаются, как правило, объекты весьма больших размеров, поэтому здесь целесообразно применять **моделирование второго типа**, т. е. с уменьшением абсолютных размеров объектов.

При решении задач геомеханики и тоннелестроения методами моделирования обычно испытывают серию моделей, причем используя наиболее эффективный для решения поставленной задачи метод, испытывают модели разных масштабов.

Например, сначала на моделях мелкого масштаба изучают общие закономерности процессов геомеханики в пределах всего участка массива, подверженного влиянию выработки, а затем на моделях крупного масштаба с большей детальностью изучают закономерности процессов в более локальной области массива, например, процессов взаимодействия пород кровли с крепью очистной выработки. При этом обычно в модели крупного масштаба воспроизводят лишь некоторую часть массива, а действие веса остальной части массива до поверхности компенсируют с помощью пригрузки, осуществляемой нагрузочными приспособлениями различного типа.

Основные положения теории подобия.

В основе методов моделирования лежит учение о подобии, основы которого заложены еще И. Ньютоном. Чтобы получить корректные результаты необходимо обеспечить подобие модели и натуры, т. е.

- 1) подобие геометрических свойств систем;**
- 2) пропорциональность физических констант, имеющих существенное значение в изучаемом процессе;**
- 3) подобие начального состояния систем;**
- 4) подобие условий на границах систем в течение всего рассматриваемого периода процесса;**
- 5) равенство определяющих критериев подобия , при этом определяющими критериями являются те, которые имеют существенное значение в изучаемом процессе.**

При характеристике того или иного механического процесса механическое подобие может быть определено заданием переходных множителей или масштабов для:

- длин (геометрическое подобие);**
- времени (кинематическое подобие);**
- масс (динамическое подобие).**

Для двух подобных систем условие **геометрического подобия** состоит в том, что все размеры пространства, занятого системой в модели, и размеры отдельных элементов модели изменены в определенное число m_L раз по сравнению с соответствующими размерами натуры:

$$L_M / L_H = m_L, \quad (12.1)$$

где L_M и L_H - соответственно линейные размеры модели и натуры.

Условие **кинематического подобия** этих систем состоит в том, что любые сходственные точки (частицы) систем, двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходят геометрически подобные пути в промежутки времени T , отличающиеся постоянным множителем m_T

$$T_M / T_H = m_T, \quad (12.2)$$

где T_M и T_H - соответственно промежутки времени модели и натуры.

Условие **динамического подобия** систем состоит в том, что массы M любых сходственных частиц этих систем отличаются друг от друга постоянным множителем m_M

$$M_M / M_H = m_M, \quad (12.3)$$

где M_M и M_H - соответственно массы модели и натуры.

Особенности объектов геомеханики состоят в том, что при заданном геометрическом масштабе моделирования ($m_L = L_M / L_H$) для обеспечения механического подобия модели и натуры необходимо отказаться в модели либо от равенства параметров прочности $s_M = s_H$, либо от равенства весовых параметров $g_M = g_H$, либо от равенства обоих показателей.

Если сохранить в модели равенство напряжений натуре (другими словами, равенство механических свойств материала модели и натуре), т.е. условие $\mathbf{s}_m = \mathbf{s}_n$, то необходимо обеспечить, чтобы объемный вес материала был больше в число раз, обратное геометрическому масштабу.

Например, при геометрическом масштабе модели $m_L = L_m / L_n = 1/100$ объемный вес материала модели должен быть равен

$$\mathbf{g}_m = (L_n / L_m m_L) \mathbf{g}_n = 100 \mathbf{g}_n. \quad (12.4)$$

Условие (12.4) можно выполнить, применив в модели натуральные горные породы и придав им фиктивный объемный вес ($100 \mathbf{g}_n$ в приведенном случае при $m_L = 1/100$) с помощью инерционных сил, которые могут быть созданы, например, путем вращения модели в центрифуге при соответствующем значении центробежной силы. Этот метод предложен в 1932 г. профессорами Г. И. Покровским и Н. Н. Давиденковым и носит название **метода центробежного моделирования**.

Если же в модели применить некоторые искусственные материалы, механические характеристики которых ниже соответствующих характеристик моделируемых горных пород, т. е. отказаться от равенства $\mathbf{s}_m = \mathbf{s}_n$, то для обеспечения условий механического подобия модели и натуре необходимо

$$\mathbf{s}_m = (L_m \mathbf{g}_m / L_n \mathbf{g}_n) \mathbf{s}_n. \quad (12.5)$$

Искусственные материалы, соответствующие механические характеристики которых в принятом геометрическом масштабе моделирования удовлетворяют по отношению к моделируемым горным породам условию (12.5), называют материалами - эквивалентами данным горным породам или **эквивалентными материалами**.

Метод моделирования, основанный на применении эквивалентных материалов, предложен в 1936 г. проф. Г. Н. Кузнецовым, и носит название **метода эквивалентных материалов**.

При моделировании системы в соответствующем геометрическом масштабе продолжительность тех или иных процессов обычно изменяется. В связи с этим существенно важное значение имеет вопрос о масштабе времени при моделировании, который в общем случае определяется, исходя из приведенного выше условия кинематического подобия двух систем (12.2).

В тех случаях, когда на моделях воспроизводят сразу несколько процессов, масштабы времени для отдельных из них могут оказаться неодинаковыми. В таких случаях масштаб времени устанавливают, исходя из соблюдения подобия в протекании лишь тех процессов, которые в решаемой задаче являются основными и не учитывают малозначащие элементы. Нагружение физических моделей осуществляется:

- созданием усилий на контуре модели при помощи механических и гидравлических домкратов или заданием деформаций контура посредством жёстких ограничителей;
- собственным весом модели массива;
- посредством центробежных сил, возникающих в центрифуге;
- с помощью сил сопротивления сдвигу, как это делается в моделях с фрикционной базой.

Последний метод предложен Р. Гудманом в 1971 г., такие модели представляют собой плоские установки, в которых гравитационные силы имитируются силами трения, возникающими при протягивании ленты под моделью объектов (рис. 12.1). При этом сила веса моделируется силами трения, возникающими при протяжке ленты под моделью, упирающейся в фиксированную планку.

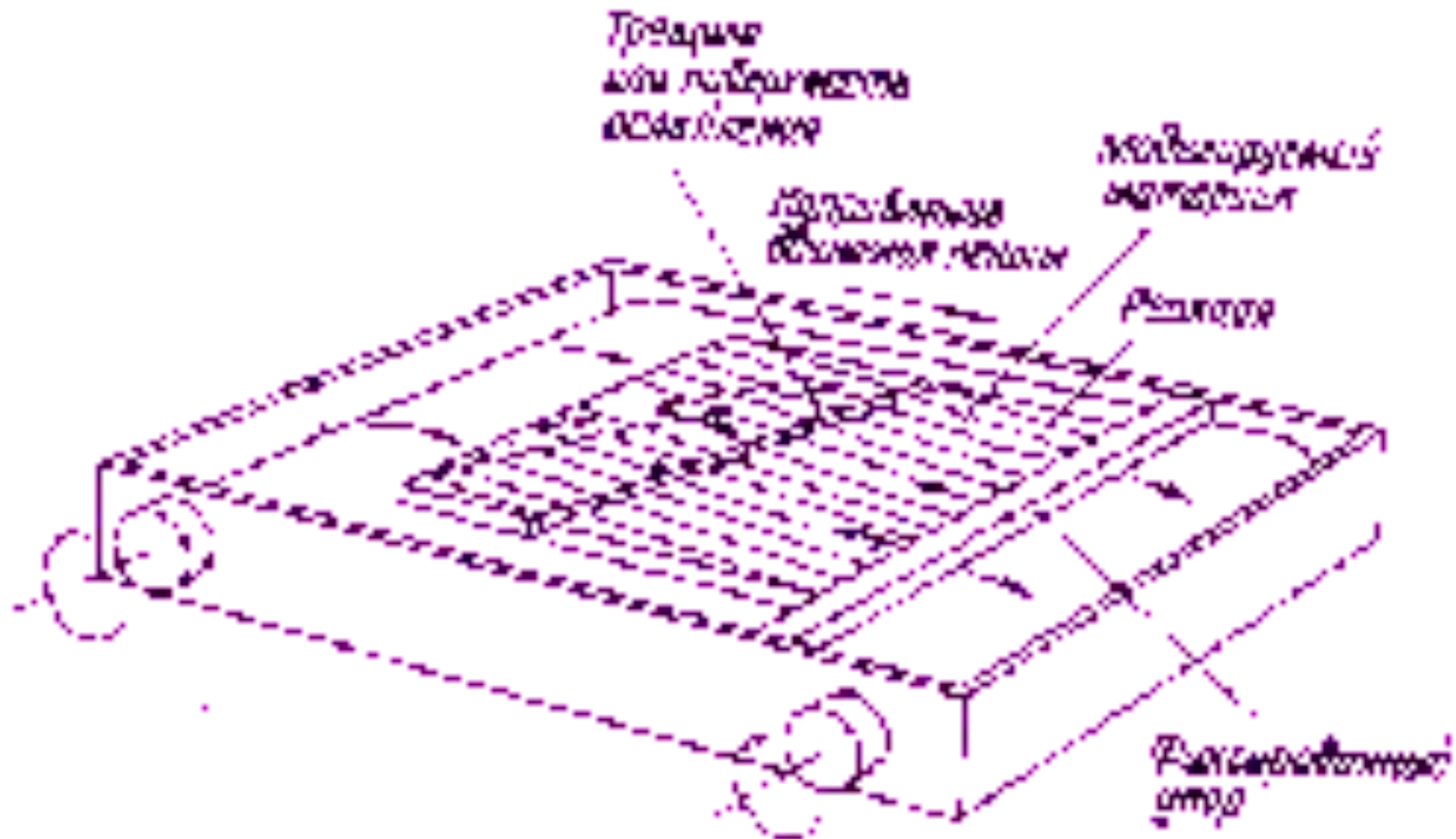


Рис. 12.1. Установка с фрикционной базой.

Метод центробежного моделирования.

Метод центробежного моделирования состоит в том, что модель из горных пород моделируемого объекта, выполненную в заданном геометрическом масштабе, помещают в каретку центрифуги (рис 12.2) и путем равномерного вращения нагружают объемными инерционными силами, придавая тем самым породам модели некоторый фиктивный объемный вес в соответствии с формулой (12.4). Фиксируя деформации и напряжения пород модели в различных точках, изучают таким путем закономерности процессов геомеханики для моделируемых условий, а также устанавливают оптимальные параметры горнотехнических объектов и сооружений по фактору устойчивости.

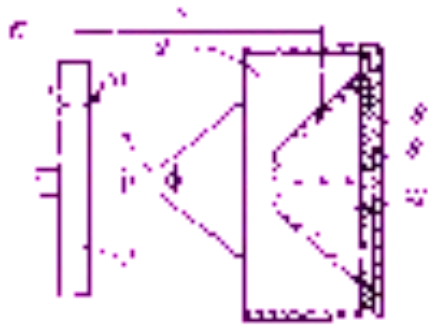
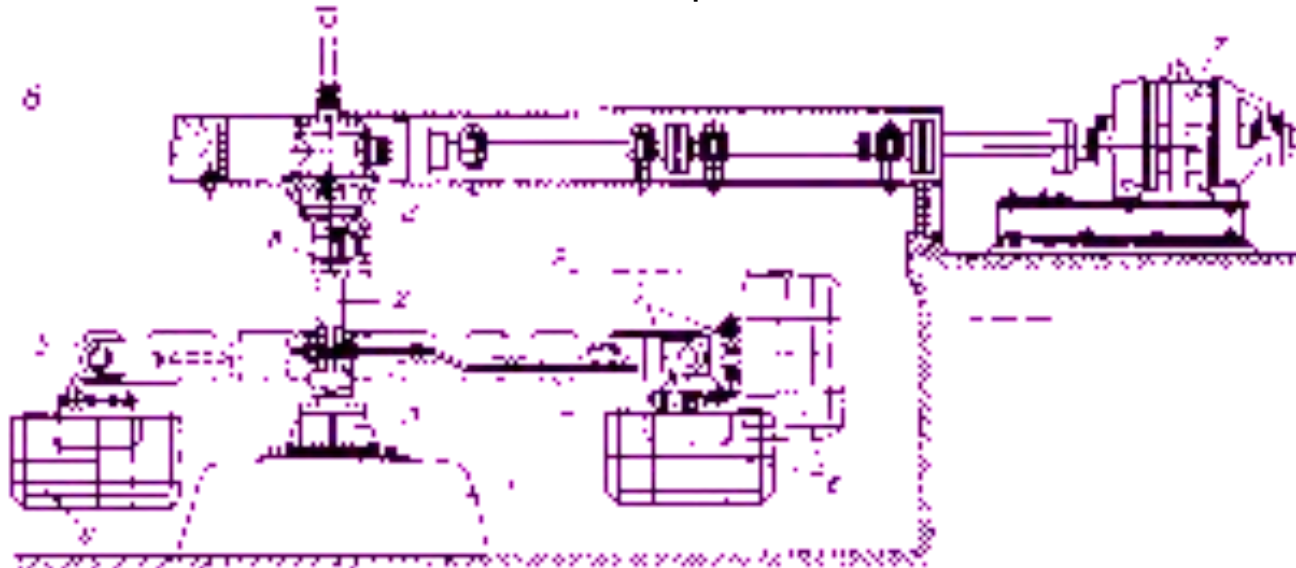


Рис 12.2. Конструкция центрифуги.

а - расчётная схема для определения основных параметров; б - конструктивная схема. 1 - фундамент; 2 - вертикальная ось; 3 - подшипники; 4 - коромысло; 5 - вилки для крепления подвесок; 6 - каретки; 7 - электродвигатель постоянного тока; 8 - коллектор; 9 - основание модели; 10 - модель.



Современные центрифуги позволяют испытывать модели высотой до 0,4—0,5 м. Обычно применяемый масштаб центробежного моделирования n находится в пределах от 20 до 500 в зависимости от решаемых задач.

Метод центробежного моделирования с успехом и большой степенью надежности применяют при решении задач, связанных с определением размеров устойчивых потолочин камер, оптимальной формы и параметров бортов карьеров и отвалов, давления обрушенных пород на днища очистных блоков, влияния длительной нагрузки на крепь капитальных выработок, пройденных в пластичных глинистых породах и др. Использование специальных устройств позволяет моделировать в центрифуге одновременное действие статического поля напряжений и динамического поля, создаваемого при взрывных работах.

Одним из достоинств центробежного моделирования является то, что это единственный из методов моделирования, в котором благодаря использованию натуральных горных пород соблюдается соответствие между размерами частиц и молекул. Для некоторых задач это имеет важное значение.

Вместе с тем метод центробежного моделирования имеет ряд ограничений. Одно из них состоит в том, что, строго говоря, центробежное моделирование не обеспечивает однородности механического силового поля. Это обстоятельство, а также технические возможности ограничивают предельные размеры моделей по высоте и возможные глубины моделируемой толщи пород.

При центробежном моделировании крайне затруднительно или невозможно воспроизводить слоистые толщи разнородных по составу и свойствам пород. Большие технические трудности представляет воспроизведение в модели перемещения забоя во времени.

Метод эквивалентных материалов.

В отличие от метода центробежного моделирования в методе эквивалентных материалов взамен натуральных горных пород используют некоторые искусственные материалы, эквивалентные породам моделируемой толщи, механические характеристики которых в принятом масштабе моделирования удовлетворяют соотношению (12.5).

Модели изготавливают в испытательных стендах, представляющих собой жесткие рамные металлические конструкции. Для испытания плоских моделей, выполненных в разрезе по простиранию перпендикулярно к плоскостям напластования, слоистости или полосчатости моделируемой толщи, применяют специализированные стенды.

Если необходимы плоские модели, выполненные для наклонного залегания пород в разрезе вкрест простирания, применяют поворотные стенды. Для объемных моделей служат трехмерные поворотные стенды.

В зависимости от решаемых задач моделирование ведут в различных геометрических масштабах: мелких, от 1:400 до 1:100, или крупных, от 1:60 до 1:10. Толщи слабых пород моделируют только в крупных масштабах.

Разделение толщи пород в модели на отдельные слои обеспечивают путем присыпки поверхности каждого слоя крупной молотой слюдой, трещиноватость или кливаж воспроизводят насечкой только что изготовленных слоев до отвердения или схватывания материалов.

Метод эквивалентных материалов позволяет с большой степенью детальности проследить процессы деформирования в толще пород при движении забоя выработки, особенно с разрывом сплошности, что обычно исключено при других методах моделирования. Вследствие этого метод эквивалентных материалов является весьма эффективным, благодаря чему он получил широкое применение при решении различных задач геомеханики.

Поляризационно-оптический метод моделирования.

Поляризационно-оптический, или просто оптический метод моделирования является примером аналогового моделирования.

Оптический метод моделирования позволяет устанавливать распределение и значения напряжений в массивах пород и элементах сооружений любой конфигурации, когда деформации модели происходят без разрыва сплошности. Метод основан на свойстве большинства прозрачных изотропных материалов, называемых оптически чувствительными, при приложении механических нагрузок приобретать оптическую анизотропию и проявлять способность двойного лучепреломления. Последнее заключается в том, что луч света, проходя через напряжённую прозрачную кристаллическую среду, разлагается на две взаимно перпендикулярные плоскополяризованные составляющие, распространяющиеся внутри среды с различной скоростью.

В частности, для задач геомеханики весьма удобно применение органических стекол и эпоксидных смол. При этом в пластинках из указанных материалов в заданном масштабе вырезаются контуры изучаемых выработок (или систем выработок), вокруг которых исследуется распределение напряжений при различных схемах нагружения пластинок по контуру растягивающими или сжимающими силами.

Другие методы моделирования.

Для решения задач, связанных с динамическими процессами в породных массивах в настоящее время часто применяют электроаналоговые методы моделирования, т. е. методы электрического моделирования механических полей.

Электрические модели могут быть двух типов. В одном из них — **методе электрогидродинамических аналогий (ЭГДА)**, предложенном в 1922 г. академиком АН СССР Н. Н. Павловским, используют меняющиеся электрические свойства сплошной проводящей среды.

Другой, известный под названием **метода электрических сеток прямой аналогии (ЭСПА)**, предусматривает замену сплошной среды сеткой из некоторых элементарных электрических ячеек, параметры которых назначают, исходя из свойств среды в механической системе и критериев подобия. Электрические ячейки — элементы напряжения, силы тока, индуктивности, емкости — служат аналогами механического напряжения, скорости упругого смещения, массы, податливости элементарных объемов моделируемого массива пород. При решении задач геомеханики наряду с применением различных методов для решения поставленных задач используют также методы, представляющие собой **комбинации** различных принципов моделирования, например принципа центробежного моделирования и принципа поляризации-оптического метода, либо метода эквивалентных материалов и центробежного моделирования.

Метод, сочетающий принцип метода эквивалентных материалов и принцип центробежного моделирования, получил научную, технологическую разработку и широкое применение в результате многолетних (с 1946 г.) исследований Криворожского научно-исследовательского горнорудного института (НИГРИ), проводившихся под руководством проф. И. Р. Ривкина.

Сущность данного комбинированного метода состоит в том, что взамен модели из натуральных горных пород, применяемой в методе центробежного моделирования, модель изготавливают из эквивалентных материалов, механические характеристики которых удовлетворяют условию геометрического подобия в некотором достаточно крупном геометрическом масштабе, например, $1/10$. Модель помещают в центрифугу и подвергают нагружению при параметрах вращения, определяемых масштабом центробежного моделирования $1/20$. В данной комбинации двух методов общий геометрический масштаб модели будет равен произведению этих двух геометрических масштабов, т. е. $1/200$, в котором и необходимо изготовить все элементы модели, подготавливаемой к испытаниям.

Изложенный подход существенно расширяет технические возможности изготовления материалов и испытания моделей в широком диапазоне геометрических масштабов.

Объемные модели из оптически чувствительных материалов также обычно нагружают с использованием центрифуги, сочетая в этом случае принципы оптического метода и метода центробежного моделирования.

Часто используют в сочетании оптический метод и метод эквивалентных материалов. Например, оптическим методом изучают с наибольшей детальностью распределение напряжений в зоне опорного давления, а методом эквивалентных материалов для тех же условий исследуют развитие деформаций толщи с разрывом сплошности и механизм взаимодействия сдвигающихся пород с крепью.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ

