

## Некоторые результаты численной оценки эффективных упруго-пластических свойств пористых материалов с помощью программного комплекса "Фидесис"

Научный руководитель – Яковлев Максим Яковлевич

*Семыкин Александр Алексеевич*

*Студент (специалист)*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
Механико-математический факультет, Кафедра вычислительной механики, Москва,  
Россия

*E-mail: aleksandr.semykin@math.msu.ru*

Доклад посвящён численному решению одной из важнейших задач механики гетерогенных материалов - задачи гомогенизации (оценки эффективных характеристик материала). Оцениваются эффективные свойства пористой упругопластической среды, подвергнутой предварительному нагружению в виде сжимающей нагрузки. Преднагружение вызывает возникновение пластических зон в области концентрации напряжений (вокруг пор), существенно влияющих на эффективные модули упругости материала.

Оценка эффективных характеристик осуществляется путём численного решения серии статических краевых упругопластических задач на представительном объёме исследуемого пористого материала либо на его ячейке периодичности. Для каждой краевой задачи моделируется многоступенчатое нагружение: на первом шаге к модели прикладывается предварительно нагружающее её давление, на втором шаге - модельная деформация уже для оценки эффективных свойств. Используются шесть типов модельных деформаций: три растяжения/сжатия (вдоль каждой из координатных осей) и три сдвига (в каждой из координатных плоскостей). Результаты решения каждой краевой задачи (поля тензора напряжений) осредняются по объёму. Эффективные модули упругости оцениваются исходя из того, какие дополнительные (сверх преднагружения) эффективные напряжения возникают вследствие прикладываемых (также после преднагружения) модельных деформаций. Рассчитываются эффективные упругие константы обобщённого закона Гука, которые затем могут быть переведены в ортотропные упругие модули (модули Юнга, коэффициенты Пуассона, модули сдвига) или даже в изотропные модуль Юнга и коэффициент Пуассона (в случае, если полученный эффективный материал изотропен).

Описанный алгоритм реализован в виде программного модуля в составе промышленного пакета инженерного прочностного анализа "Фидесис". Функционал модуля включает в себя оценку эффективных свойств преднагруженного материала с учётом физической нелинейности (пластичность) и геометрической нелинейности (конечные деформации). Реализована возможность оценки эффективных модулей Юнга на растяжение и на сжатие (в случае преднагруженной упругопластической среды они в общем случае будут разными).

Проведено несколько серий расчётов эффективных свойств преднагруженного пористого упругопластического материала (идеальная пластичность по Мизесу). Для тестирования разработанного алгоритма и программного кода численные результаты сравнивались с аналитической формулой В.М. Ярушиной [1] для двумерной задачи о преднагружении упругопластической среды с круглым отверстием (задача Галина). Сравнение показало хорошую сходимость результатов (погрешность в пределах 5%). Серия расчётов с негидростатическим преднагружением пористой среды продемонстрировала явление наведённой анизотропии: когда в материале с изотропной геометрической структурой пор и с изотропными упругопластическими свойствами сплошного материала вследствие преднагружения возникают анизотропные пластические зоны вокруг пор - и эффективные свойства такого материала получаются анизотропными.

**Источники и литература**

- 1 Yarushina, V.M., Podladchikov, Y.Y., Wang, H., 2020. Model for (de)compaction and porosity waves in porous rocks under shear stresses. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125, e2020JB019683.