

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРНА ПУТЁМ РАСЧЁТА НА ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРАХ

^{1,2}Яковлев М.Я., ^{1,2}Никитин Л.С. ¹Левин В.А.

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва

²ООО «Фидесис», Москва

Керном называется образец горной породы, добытый из глубины земли с помощью специального вида бурения. Большой практический интерес к исследованию эффективных механических характеристик кернов обусловлен тем, что знание этих свойств позволяет проводить моделирование геомеханических процессов на масштабе скважины или на масштабе месторождения, которое позволяет избежать негативных явлений (неустойчивость ствола скважины, обрушение горного массива) в ходе добычи полезных ископаемых. Существуют методики лабораторных экспериментов, позволяющие оценить механические свойства кернов – однако они зачастую требуют значительных временных и финансовых затрат, а также приводят к разрушению керна. В качестве альтернативы существует метод компьютерной томографии, который позволяет построить цифровую (воксельную) модель керна и проводить на ней численные эксперименты вместо натуральных.

Однако при численном решении на таких моделях задач механики деформируемого твёрдого тела при помощи классического метода конечных элементов (который реализован в большинстве универсальных САЕ-систем) возникает проблема, связанная с большим размером воксельных структур. Воксельная модель полноразмерного керна может насчитывать до миллиарда вокселей и выше, и расчёт с использованием метода конечных элементов в этом случае влечёт за собой большой расход оперативной памяти и требует использования суперкомпьютера.

В докладе описывается альтернативный метод численной оценки эффективных механических характеристик полноразмерного керна на его воксельной модели [0]. Оценка производится путём расчёта на представительном объёме [0] керна, т.е. путём решения на таком объёме ряда краевых задач теории упругости с различными граничными условиями (растяжения/сжатия, сдвиги). Для численного решения краевых задач используется метод установления с явной схемой по времени: изначально решается динамическая задача, которая сводится к статической после затухания волн в модели. Краевые задачи описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \nabla \cdot \sigma \quad (1)$$

где ρ – плотность, v – скорость, σ – тензор напряжений. Для решения задачи используется метод конечных разностей на регулярной декартовой сетке. Результаты решения каждой задачи осредняются по объёму по формуле

$$\sigma^e = \frac{1}{V} \int_V \sigma dV \quad (2)$$

Эффективные упругие характеристики кернов оцениваются в виде обобщённого закона Гука – линейной зависимости между эффективным тензором напряжений σ^e , вычисленным в (2), и эффективным тензором деформаций, который определяется заданными в каждой задаче граничными условиями:

$$\sigma_{ij}^e = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e \quad (3)$$

Описанный метод был реализован в виде исследовательской программы с распараллеливанием при помощи технологии CUDA. Расчёты проводились на графическом процессоре NVIDIA Tesla A100, содержащем 80 Гб видеопамяти. Оценивались эффективные свойства керна из песчаника, цифровая модель которого содержит 1300^3 вокселей (рис. 1).

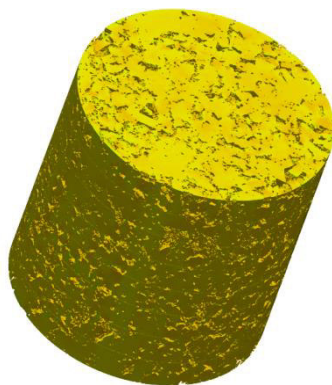


Рис. 1. Цифровая модель ядра из песчаника

Реализация программы с использованием высокопроизводительных вычислений позволила провести серию расчётов для фрагментов ядра в форме прямоугольных параллелепипедов разного размера, центры которых располагались в центре ядра. Исследовалась зависимость пористости и модуля Юнга от количества вокселей в фрагменте. Графики зависимости представлены на рис. 2.

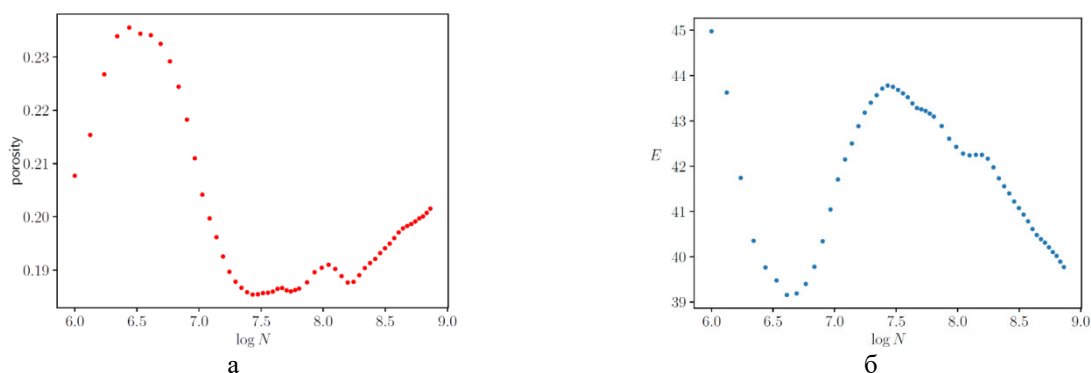


Рис. 2. Зависимость пористости (а) и эффективного модуля Юнга E в ГПа (б) от размера фрагмента

Графики показывают, что при расчёте на малых фрагментах ядра результат при увеличении фрагмента сильно колеблется: т.е. фрагменты порядка 1–10 млн. вокселей не являются представительным объёмом ядра. При дальнейшем увеличении исследуемых фрагментов (начиная примерно с 30 млн. вокселей) их пористость начинает практически монотонно расти, а эффективных модуль Юнга – монотонно уменьшаться. Увеличение пористости при приближении к границе исходного ядра может свидетельствовать о появлении в нём побочных трещин и пор вследствие рассыхания в процессе транспортировки от места бурения до места проведения компьютерной томографии. Поскольку при исследовании ядра интерес представляют свойства исходной горной породы, находящейся на глубине земли (без учёта изменений в ядре вследствие рассыхания) – можно сделать вывод, что границы рассчитываемых фрагментов цифровой модели ядра не должны быть слишком близки к границам исходного ядра. Для исследуемого ядра из песчаника такими являются фрагменты размером примерно от 30 до 100 млн. вокселей.

Работа выполнена в МГУ имени М.В. Ломоносова за счёт гранта Российского научного фонда (проект №19-71-10008).

1. Яковлев М.Я., Быстров И.Д., Зингерман К.М., Левин В.А. Численное моделирование влияния порового нагружения на эффективные механические свойства горных пород с помощью CAE Fidesys // Тезисы докладов международной конференции «Физическая мезомеханика», 6-10 сентября 2021 г., Томск, Россия. С. 92–93.
2. Vershinin A.V., Levin V.A., Zingerman K.M., Sboyshakov A.M., Yakovlev M.Ya. Software for estimation of second order effective material properties of porous samples with geometrical and physical nonlinearity accounted for // Advances in Engineering Software. 2015. Vol. 86. P. 80–84.