

О НЕКОТОРЫХ ИТОГАХ МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА DECOVALEX

При математическом моделировании крупных геотехнических сооружений важен учёт так называемых сопряженных (coupled) процессов, то есть ситуаций, когда процессы различной природы (тепловые, гидравлические, химические и т. д.) оказывают заметное влияние друг на друга. При этом корректное моделирование одного или нескольких из них невозможно без рассмотрения прочих. 4–5 ноября 2019 года в г. Бругг (Швейцария) проходил симпозиум DECOVALEX 2019, посвященный моделированию сопряженных процессов, протекающих при захоронении радиоактивных отходов, и подземным инженерным прикладным технологиям (DECOVALEX 2019 Symposium on Coupled Processes in Radioactive Waste Disposal and Subsurface Engineering Applications). Международный проект DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments, <https://decovallex.org/>) действует с 1992 года при поддержке организаций, занимающихся обращением с ядерными отходами, и регуляторов. Основные цели проекта — развитие расчетных средств для моделирования сопряженных процессов в геотехнических сооружениях (в первую очередь — ПГЗРО), их валидация и расширение экспериментальной базы. Работы в проекте DECOVALEX проводятся этапами длительностью в несколько лет. На каждом из них выбирается набор экспериментов или бенчмарков, существенных для обеспечения безопасности ПГЗРО, в которых исследуются сопряженные процессы. Команды-участники моделируют их различными численными средствами, как с учетом экспериментальных результатов, так и в слепом режиме. По результатам моделирования вырабатываются рекомендации по применению моделей, их развитию и постановке новых экспериментов. Симпозиум в Бругге был посвящен подведению итогов 7-го этапа проекта DECOVALEX, на котором, в основном, рассматривались эксперименты по моделированию глин как вмещающей породы и основы инженерных барьеров безопасности (ИББ). В симпозиуме приняли участие около 150 человек.

Изначально исследования по программе DECOVALEX концентрировались вокруг тепло-гидро-механических (ТНМ) процессов, впоследствии добавились химические (С).

На прошедшем симпозиуме в программном выступлении руководителя НИОКР в Andra **Frederic Plas** речь шла о перспективе учета радиологических, массопереносных и биологических процессов (ТНМCR+Tr+V coupling). Также прослеживается увеличение количества исследований, связанных с захоронением радиоактивных отходов в глинах. Видимо, причина этого в том, что финская и шведская экспериментальные программы, связанные с кристаллическими породами, подходят к концу, а французская и швейцарская — в самом разгаре.

**Frederic Plas**, говоря об актуальных задачах в сопряженном моделировании, выделил анализ неопределённостей и развитие многомасштабных моделей как во времени, так и в пространстве. Также он отметил необходимость при выборе процессов для исследования исходить из их влияния на функции безопасности с учетом PARS (Phenomenological Analysis of Repository Situations) или матрицы взаимодействий на основе FEPs. Было отмечено, что рассмотрение полного ТНМCR+Tr+V сопряжения будет слишком сложным. Для облегчения моделирования могут быть применены следующие подходы: упрощение (самих моделей или связей между ними), локализация (рассмотрение процессов, характерных для конкретных глубин), разделение процессов (учет только существенных с точки зрения безопасности взаимосвязей), ограничение набора моделируемых одновременно процессов (ТМ, ТНМ, ТНС и т. д.), привязка моделей к конкретному проекту ПГЗРО. Также он напомнил о необходимости учета «редких» — случающихся раз в тысячелетие и реже — явлений в граничных условиях или возмущениях системы.

**Lyesse Laloui**, один из ведущих специалистов в области механики пород (École Polytechnique Fédérale de Lausanne), говорил о сходстве и различиях геологических инженерных решений: ПГЗРО, добыча сланцевой нефти, закачка газов в подземные резервуары, геотермальная энергетика. Во всех случаях растет важность учета в сопряженных расчетах транспорта газов и пара, при этом необходим учет пористости среды в широком диапазоне, вплоть до нанометров. При этом результат моделирования чувствителен к особенностям движения воды и ее химическому составу.

Основная часть докладов была посвящена итогам отдельных проектов (Tasks), проходивших в рамках завершившегося этапа программы. Так, **Antonio Gens** (Университет Каталонии) сообщил о результатах Task D — Hydro-mechanical interactions in bentonite engineered barriers (INBEV) — ТМ и ТНМ моделировании крупномасштабных экспериментов Engineered Barrier Emplacement (Mont Terri) и FEBEX (Grimsel). При моделировании рассматривалась эволюция бентонитового буфера.

**J. F. Harrington** (British Geological Survey) подвел итоги работы Task A — modEllinG Gas INjection ExpERiments (ENGINEER) — моделирование лабораторных 1D и 3D экспериментов по перемещению газа в природных глинах и бентоните. В проекте было 8 участников, которые использовали комбинации различных моделей гидравлики, двухфазных течений, пористости, образования трещин.

**Tobias Meier** (Geomcon, Германия) доложил о моделировании в рамках Task G — EDZ evolution in sparsely fractured competent rock — эксперимента по проницаемости зоны разуплотнения (EDZ) в тоннеле TAS04 в массиве Forsmark. Отмечалась проблема предсказания случаев, когда трещины образуют непрерывный канал между скважинами (channeling). Этот процесс — сугубо стохастический, и на данный момент неясно, какие модели могут адекватно описывать движение воды с его учетом в областях размером несколько метров и более.

**Teruki Iwatsuki** (IAEA) говорил о Task C — Groundwater REcovery Experiment in Tunnel (GREET) — моделировании эксперимента GREET в ПИЛ Mizunami. Изучалось обводнение выработки после закрытия. Отмечается рост pH в воде вследствие вымывания веществ из бетона и падение концентрации растворенных минералов из-за увеличения количества воды.

**Hua Shao** (BGR) рассказывал о моделировании в рамках Task F — Fluid inclusion and movement in tight rock (FINITO) — проницаемости EDZ для CO<sub>2</sub> в залежах соли, говорил о важности процессов в микромасштабе, что связано с характерным размером зерен соли. Отмечается, что процесс проходки повышает проницаемость соли на два порядка. Для соли в термине EDZ существенно различие между damaged (поврежденная) и disturbed (нарушенная) zone — в первом

случае возникают новые трещины, во втором — растет проницаемость сплошной среды.

Целый ряд докладов был посвящен экспериментальному исследованию свойств бентонита при его насыщении водой. Исследовались динамика набухания, ее зависимость от состава бентонита и воды, проницаемость газов и т. д. Предлагались различные модели для описания этих процессов. Отмечалось, что основной проблемой моделирования является большое количество параметров для калибровки и ограниченная валидационная база.

Большое внимание уделялось проблеме формирования трещин в горных породах и в ИББ при поступлении воды под давлением. Рассматривалось как численное моделирование, так и экспериментальные исследования.

Отдельная секция была посвящена перспективным методам использования ТНМС расчетных средств. Рассматривался широкий спектр возможных геомеханических приложений, вплоть до таких отдаленных перспектив, как геотермальная энергетика на сверхкритической воде.

На обсуждениях по результатам симпозиума высказывались мнения о перспективах развития проекта DECOVALEX и о главных нерешенных на данный момент проблемах. В качестве возможного направления развития рассматривались такие направления, как изучение напряженно-деформированного состояния породы при закачке жидкостей и газов в полости (гидроразрыв при добыче углеводородов, закачка газов в подземные хранилища), а также химические процессы, в первую очередь, — приводящие к нарушению инженерных барьеров безопасности. Отмечены существующие проблемы с корректным сопряжением моделей рассматриваемых процессов, выбором между непрерывным и дискретным представлением трещиноватой среды, постановкой граничных условий при моделировании распространения нуклидов после разрушения ИББ. Уделялось внимание проблеме избытка данных мониторинга, когда в экспериментах собирается больше данных, чем требуется современным моделям, в результате чего возникает задача усреднения данных. Кроме того, все участники итогового обсуждения отметили проблему пространственного масштабирования моделей.

*Материал подготовлен Е. В. Моисеенко*