**Современные подходы к численному гидрогеологическому моделированию в задачах обоснования безопасности объектов использования атомной энергии**

###### И.В. Капырин1

*1ИБРАЭ РАН, г. Москва,*

*эл. почта: kapyrin@ibrae.ac.ru*

Одним из наиболее существенных аспектов безопасности ОИАЭ является потенциальное воздействие объектов на подземные воды. Он является ключевым для пунктов захоронения и хранения РАО, а также выводимых из эксплуатации путем захоронения на месте ОЯН, и существенным для объектов, на которых возможны утечки загрязненных вод в окружающую среду. Численное гидрогеологическое моделирование является основным инструментом оценки безопасности ОИАЭ в части потенциального загрязнения подземных вод. Среди наиболее сложных объектов, требующих гидрогеологического моделирования, следует упомянуть функционирующие более 50 лет в России ПГЗ ЖРО («Железногорский», «Северский», «Димитровградский») и проектируемый ПГЗРО на участке Енисейский в Красноярском крае. Основные сложности численного моделирования для объектов атомной отрасли на сегодняшний день связаны со следующими факторами:

* Необходимостью выполнения прогнозов на сверхбольшие времена, определяемые периодом потенциальной опасности объектов. Период моделирования может составлять сотни тысяч и даже миллион лет.
* Взаимовлиянием множества физических и химических процессов, происходящих как в геологической среде, так и в инженерных барьерах безопасности (ИББ).
* Необходимостью обеспечения достаточной точности расчетов и оценки неопределенностей результатов расчета.
* Сложностью строения геологических сред (в особенности, трещиноватых) и самих объектов.

Эти трудности являются основными стимулами к развитию расчетных кодов гидрогеологического моделирования, они продиктовали фактически произошедший переход на новые вычислительные технологии: использование неструктурированных локально сгущающихся сеток, параллельные расчеты. На этих технологиях основан расчетный код GeRa, обеспечивающий на сегодняшний день широкие возможности моделирования: фильтрации в различных постановках (насыщенно-ненасыщенной, напорно-безнапорной, двухфазной); массо- и теплопереноса с учетом химических взаимодействий, плотностной конвекции, двойной пористости сред и многих других эффектов. Отличительной особенностью GeRa является интегральный подход, т.е. возможность решения задачи оценки безопасности от начала до конца: от построения геологической модели по данным полевых изысканий и решения фильтрационной и миграционной задач до оценки доз для населения и неопределенностей (последнее – с помощью программы MOUSE).

Ориентируясь на опыт разработки и аттестации GeRa, анализ иных разработок (AMANZI, MOFLOW-USG, PFLOTRAN) и потребностей отрасли, можно сказать, что дальнейшие усовершенствования расчетных кодов связаны с развитием моделей фильтрации и переноса в трещиноватых средах, мультифизичных моделей, которые позволят учесть динамику эволюции ИББ и выщелачивания радионуклидов, моделей со сложными химическими взаимодействиями в системе вода-порода и биологическими процессами. Наличие в России богатого опыта эксплуатации различных ЯРОО должно обеспечить уникальные исходные данные для построения и верификации этих моделей.