ПРОГНОЗ ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ГАЗА В КАМЕННОЙ СОЛИ ПРИ ЕГО ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SIMULIA ABAQUS С УЧЕТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Журавлѐва Т.Ю. *к.г-м.н.,* Калиниченко И.В[1]. *к.г-м.н.,* Тропкин С.Н.[2]
1)ООО «Подземгазпром», Москва, Россия.
2) ООО «ТЕСИС», Москва, Россия.

Хранение газообразных и жидких углеводородов в каменной соли является достаточно новым способом. К настоящему времени общее число выработок подземного хранения в каменной соли превысило 2000, из которых более 600 – выработки-емкости для хранения природного газа в каменной соли.

В Российской Федерации для обеспечения надежности газоснабжения при аварийных ситуациях и для покрытия пиковых нагрузок газопотребления в холодное время года предусмотрено строительство нескольких ПХГ в каменной соли.

Выработки ПХГ – незакрепленные, создаются методом дистанционного растворения в соляных штоках, куполах или пластовых залежах.

Каменная соль как среда для подземных хранилищ, выбрана в связи с тем, что она уже при небольших действующих напряжениях проявляет реологические свойства, т. е. существует возможность самозалечивания трещин, таким образом, исключается возможность миграции хранимого продукта.

С другой стороны проявление реологических свойств каменной солью приводит к образованию областей запредельного деформирования в окрестности кровли выработки и, как следствие, ее обрушению, а также к заплыванию выработки (конвергенции), что в свою очередь вызывает оседание земной поверхности.

Нормальная эксплуатация подземных резервуаров возможна, если возникающее в их окрестности напряженно-деформированное состояние не приводит к потере герметичности и обрушениям, нарушающим связь резервуаров с наземными сооружениями. Для обеспечения этих требований необходимо знать геометрические размеры резервуаров, границы изменения противодавления при эксплуатации, а также объем их конвергенции (уменьшение вместимости).

Для оценки напряженно-деформированного состояния соляного массива в окрестности выработок нами до недавнего времени использовался разработанный в ООО «Подземгазпром» конечно-элементный программный комплекс, который, к сожалению, не позволял рассматривать геомеханические процессы во времени и при переменных нагрузках. Таким образом, не было возможности моделирования реальной схемы циклической эксплуатации подземных резервуаров – хранение газа при максимальном и минимальном противодавлении с учетом отбора и закачки газа.

К тому же существующий программный комплекс не позволял моделировать выработки неправильной формы.

Однако большим преимуществом существующего программного комплекса является реализованная в нем математическая модель реологического поведения каменной соли, хорошо описывающая экспериментальные кривые ползучести и достаточно близко согласованная с практикой эксплуатации существующих подземных хранилищ.

В связи с этим, с целью оценки устойчивости подземных резервуаров при их циклической эксплуатации был использован программный комплекс **SIMULIA/Abaqus**.

Для моделирования сложного нелинейного поведения каменной соли в окрестности выработки была выбрана расширенная вязкопластическая модель Drucker-Prager, позволяющая задавать прочностные свойства материала при растяжении-сжатии, кривую упрочнения, а так же закон ползучести материала.

По результатам предыдущих исследований для моделирования реологического поведения каменной соли был выбран закон «временного упрочнения»:

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^{cr} = A(\bar{\sigma}^{cr})^n t^m, \qquad (1)$$

где $\dot{\bar{\varepsilon}}^{cr}$ - эквивалентная скорость деформации ползучести;
$\bar{\sigma}^{cr}$ - эквивалентные напряжения ползучести;
t –время действия нагрузки.
A,m,n – задаваемые пользователем параметры закона ползучести.

Для определения реологических параметров каменной соли проводились эксперименты на ползучесть при сложном напряженно-деформированном состоянии, позволяющие приблизить поведение образцов каменной соли к поведению массива, вмещающего подземные выработки, расположенные на определенной глубине. Глубина их расположения моделировалась заданием главных напряжений, действующих на торцы и боковую поверхность образцов, значение которых соответствовало весу вышележащих пород.

По результатам экспериментальных исследований на ползучесть образцов каменной соли при сложном напряженном состоянии определялись параметры *A, m, n* используемые в законе «временного упрочнения», при которых обеспечивается наиболее точное приближение математической функции закона ползучести к экспериментальным кривым для различных значений разности напряжений.

Данные эксперименты на ползучесть при сложном напряженно-деформируемом состоянии позволяют получить эквивалентные напряжения ползучести $\bar{\sigma}^{cr}$, соответствующие длительной прочности каменной соли. За предел длительной прочности принимается та разность главных напряжений, при которой объемные деформации в процессе ползучести за время продолжительности эксперимента приближаются к нулевым значениям, то есть не наблюдается изменение объема образца к концу эксперимента.

Для оценки корректности использования данного закона ползучести, при расчете устойчивости подземных выработок в каменной соли с учетом определенных в ходе эксперимента параметров уравнения состояния, проводилось моделирование этого эксперимента в программном комплексе SIMULIA/Abaqus. Расчеты осуществлялись при двух значениях разности главных напряжений – на уровне предела длительной прочности и выше него, при одной и той же их сумме. При моделировании соблюдались все условия проведения опыта путем заданий нагрузок и граничных условий по перемещениям. При задании реологических свойств использовались параметры, определенные в результате эксперимента**.** В результате было получено, что объем образца при моделировании для разности главных напряжений, соответствующих пределу длительной прочности не изменился, а при большей разности главных напряжений наблюдалось разрыхление образца и, как следствие, увеличение объема.

Таким образом, доказана правомерность использования полученных в результате эксперимента параметров реологической модели «временного упрочнения» для моделирования в программном комплексе SIMULIA/Abaqus геомеханического поведения массива каменной соли, вмещающего выработку при циклической эксплуатации подземного хранилища.

За критерий по деформациям принималась зависимость (1) при эквивалентном напряжении ползучести, соответствующем пределу длительной прочности.

В задаче прогноза устойчивости выработки определялось статическое напряженно-деформированное состояние массива каменной соли в окрестности выработки при различных значениях внутреннего противодавления хранимого продукта.

Задача решалась в трехмерной постановке. На первом этапе задавалось естественное напряженное состояние вмещающего выработку породного массива с помощью специального типа расчѐтного шага Geostatic. В последней десятой версии SIMULIA/Abaqus реализовано автоматическое задание геостатики, причем существует возможность выбора необходимой точности по перемещениям. Геостатическое равновесие в массиве служило исходным состоянием для оценки влияния выработки на вмещающий массив каменной соли.

На второй ступени анализа моделировалась экскавация каменной соли при формировании выработки заданной формы. Принималось, что процесс экскавации выработки в массиве каменной соли представляет собой мгновенное выщелачивание массива с помощью воды с образованием рассола и последующим мгновенным его вытеснением хранимым продуктом. Таким образом, процесс экскавации задавался как мгновенное удаление из расчѐтной модели зон, соответствующих формируемому объему выработки. Этот процесс достаточно удобно реализован в программном комплексе. Моделирование процесса экскавации производилось с помощью отключения геометрических зон в расчѐтной модели.

После завершения процесса экскавации моделировалось циклическое изменение давления газа в подземном хранилище в течение 50 лет по закону, который соответствует поставленной задаче. Как правило, циклы состояли из идентичных по времени периодов хранения газа при минимальном и максимальном противодавлениях или из уменьшенных по времени периодов хранения газа при минимальном давлении и увеличенных – при максимальном. Если необходимо было предусмотреть ремонтные работы, то цикл изменялся в зависимости от срока эксплуатации резервуара до начала ремонта и его продолжительности.

Общими задачами для всех рассматриваемых случаев являлось задание циклического изменения противодавления газа, прикладываемого к внутреннему контуру выработки и, в связи с этим, исследование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива каменной соли, с учетом упрочнения и реологических свойств, в процессе циклической эксплуатации ПХГ.

В результате расчета получено изменение деформаций ползучести во времени при заданных циклических воздействиях противодавления. С помощью критериальной кривой определено допустимое минимальное противодавление газа с учетом циклической эксплуатации хранилища.

Одним из основных преимуществ данного программного комплекса является то, что с его помощью существует возможность оценить, как развивается заданный нами процесс в тот или иной момент времени при различной его длительности. В результате проведенных расчетов проанализировано развитие деформаций ползучести во времени при различных сроках начала и длительности проведения ремонта и определена возможность снижения противодавления до нулевых значений в тот или иной срок эксплуатации на тот или иной временной период**.**

Таким образом, программный комплекс SIMULIA/Abaqus позволяет оценить устойчивость выработок, созданных в массиве горных пород с нелинейным поведением, в процессе циклической эксплуатации подземного хранилища с учетом экспериментальных исследований.