

СОЗДАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ РАСЧЁТА ПОДЗЕМНЫХ ГАЗОВЫХ ХРАНИЛИЩ В МАССИВЕ КАМЕННОЙ СОЛИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SIMULIA ABAQUS С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Журавлёва Т.Ю.¹. к.г.-м.н., Волков-Богородский Д.Б.². к.ф.-м.н., Тропкин С.Н.³

1) ООО «Подземгазпром», Москва, Россия.

2) Институт Прикладной Механики РАН, Москва, Россия.

3) ООО «ТЕСИС», Москва, Россия.

В практике подземного хранения большое распространение получили бесшахтные подземные хранилища в отложениях каменной соли. Они используются для различных целей, в том числе для размещения стратегических запасов сырой нефти и светлых нефтепродуктов, в качестве товарно-сырьевых баз для нефтехимического и химического производства, для создания пиковых и аварийных хранилищ природного газа.

В отличие от подземных хранилищ шахтного типа, сооружаемых горнопроходческим способом, бесшахтные подземные резервуары сооружаются методом подземного растворения каменной соли через буровые скважины. Бесшахтный подземный резервуар состоит из выработки-емкости, используемой для размещения хранимого продукта, и эксплуатационной скважины. Выработка-емкость имеет, как правило, осесимметричную форму и сводчатую кровлю, причем осью симметрии является скважина. Выработки – емкости имеют пролет до 80 м, высоту до нескольких сотен метров и вместимость от десятков тысяч до миллиона кубометров.

Широкое применение бесшахтных подземных хранилищ в каменной соли обусловлено физическими, физико-химическими и химическими свойствами каменной соли как горной породы, вмещающей выработку-емкость. Способность растворения каменной соли водой делает возможным применение скважинной гидротехнологии для сооружения выработки. Химическая инертность каменной соли по отношению к углеводородам в совокупности с отсутствием кислорода и стабильностью температуры и давления обеспечивает сохранение качества товарных углеводородных продуктов. В выработках-емкостях подземных хранилищ в каменной соли появившиеся по той или иной причине трещины способны самозалечиваться вследствие вязкопластических деформаций соли, что обеспечивает практическую непроницаемость соляных массивов и герметичность подземных резервуаров. Технология сооружения бесшахтных резервуаров не допускает их крепления, поэтому для обеспечения устойчивости при больших глубинах заложения выработки - емкости эксплуатируются под избыточным давлением, что является достоинством при хранении некоторых углеводородных продуктов – например, возможно хранения газов в сжатом и сжиженном состоянии (Рис.1).

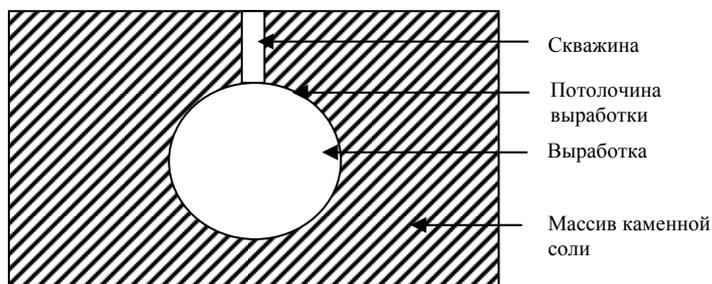


Рис. 1. Схема подземного хранилища в массиве каменной соли

По технологиям, разработанным в ООО «Подземгазпром», построены и эксплуатируются множество подземных резервуаров для хранения жидких и газообразных углеводородов.

В ООО «Подземгазпром» программный комплекс [SIMULIA Abaqus](#) используется для решения следующих задач, характерных для подземных хранилищ в массивах каменной соли:

- Исследование напряженно-деформированного состояния массива каменной соли в окрестности выработки.
- Моделирование процесса экскавации выработки в массиве каменной соли.
- Исследования процесса заплывания выработки вследствие проявления солью реологических свойств.

Главной особенностью моделирования подземных хранилищ в каменной соли является то, что соль – материал со сложным нелинейным поведением, проявляющий реологические свойства. В связи с этим возникает проблема выбора адекватной модели материала, из доступных в программном комплексе Abaqus Unified FEA, для моделирования поведения каменной соли за пределом упругости.

В качестве модели нелинейного поведения материала для анализа массивов каменной соли была выбрана расширенная вязкопластическая модель Drucker-Prager, широко используемая в задачах геомеханики. Эта модель позволяет задавать свойства материала при растяжении-сжатии, кривую упрочнения, а так же закон ползучести материала.

В рамках модели Drucker-Prager доступно четыре способа задания закона ползучести материала:

- Использование подпрограммы CREEP для задания собственного закона ползучести материала.
- Закон «временного упрочнения»
- Закон «деформационного упрочнения»

- Закон Singh-Mitchell

Было проведено исследование, по результатам которого для моделирования реологического поведения каменной соли был выбран закон «временного упрочнения», имеющий вид следующей зависимости:

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

где $\dot{\epsilon}^{cr}$ - эквивалентная скорость деформации ползучести

$\bar{\sigma}^{cr}$ - эквивалентные напряжения ползучести

t - время действия нагрузки

A, m, n – задаваемые пользователем параметры закона ползучести.

Для определения поведения массивов каменной соли проводятся эксперименты, в которых цилиндрические образцы каменной соли нагружаются одноосным давлением по торцам, или трехосным (всесторонним) давлением. По результатам эксперимента определяются зависимости деформаций, возникших в образце, от времени приложения и величины действующей нагрузки. На основе экспериментальных данных определяются зависимости скорости деформаций от времени и величины нагрузки. Полученная зависимость скоростей деформации используется для определения коэффициентов A , m , n используемых в законе «временного упрочнения».

Для определения параметров законов ползучести по экспериментальным данным используется минимизация функционала погрешности между экспериментальными и расчетными данными с использованием метода наименьших квадратов. Определяются параметры, при которых обеспечивается наиболее точное приближение математической функции закона ползучести к экспериментальной кривой.

Был разработан инструментарий для определения параметров A , m и n на основе таблиц и формул программы Excel на пределе длительной прочности образцов каменной соли. Результаты определения параметров определены на рисунке 2.

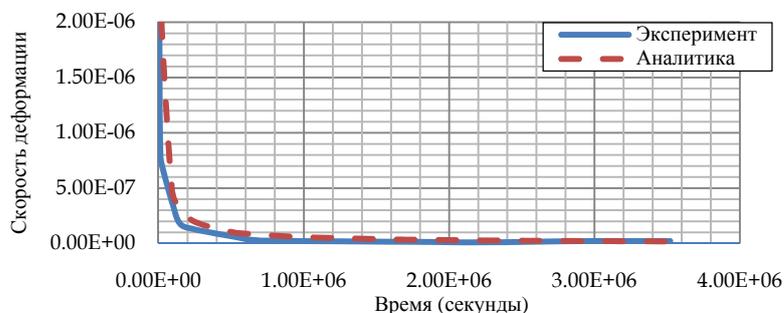


Рис.2. Сравнение экспериментальной зависимости и закона реологического поведения образца каменной соли

В программном комплексе Abaqus Unified FEA была создана модель, симулирующая процесс проведения эксперимента по определению реологических свойств соли. В качестве параметров модели материала использовались вычисленные параметры A , m , n .

По результатам расчётов был построен обобщенный график скоростей деформаций в зависимости от действующей нагрузки (Рис. 3).

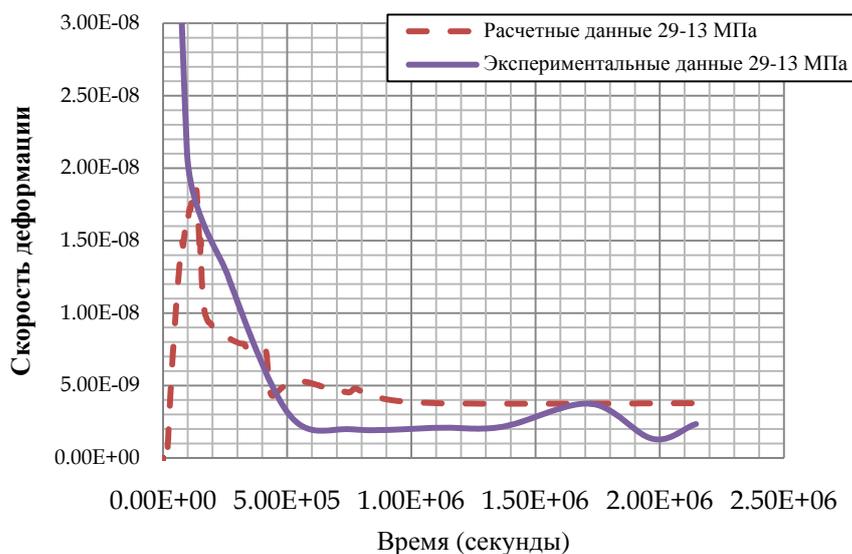


Рис. 3. Сравнение изменения скоростей деформации от времени в экспериментальных данных на трехосное сжатие с расчётными значениями

Как видно из представленного графика, численное моделирование с достаточной степенью точности совпадает с экспериментальными данными на большей части истории нагружения. Таким образом, разработанный алгоритм определения параметров для закона «временного упрочнения», а так же сам закон реологического поведения материала «временного упрочнения» можно использовать при моделировании выработок в массивах каменной соли.

Полученные значения используются для решения полного цикла задач исследования поведения хранилища в массиве каменной соли:

- экскавация подземного хранилища
- исследование устойчивости выработки
- расчёта заплывания выработки при циклической эксплуатации

Все расчёты проводятся в осесимметричной постановке или же при сложной несимметричной геометрии выработки – в трехмерной постановке. Задаются граничные условия, запрещающие вертикальные перемещения нижней поверхности массива, а также горизонтальные перемещения боковых поверхностей исследуемой зоны массива. В расчёте задается гравитационное воздействие, а также давление вышележащих грунтов на верхнюю поверхность исследуемой зоны массива.

Одним из основных достоинств программного комплекса Abaqus Unified FEA является возможность реализации в грунтовом массиве естественного напряженного состояния без учета деформаций. Подобное состояние удастся получить с помощью специального типа расчётного шага Geostatic, позволяющего задать начальное напряженное состояние массива. Расчёт для получения геостатического равновесия проводится перед любым другим расчётом грунтовых массивов и используется как исходное состояние в модели.

В расчёте экскавации подземного хранилища моделируется постепенный процесс увеличения объема выработки на разные моменты времени в процессе размытия массива каменной соли. Исследуется напряженно-деформированное состояние массива и зоны пластических деформаций. Полученные данные используются как исходные значения для последующих расчётов. Моделирование процесса экскавации выполняется с помощью инструмента, позволяющего постепенно исключать из расчётной области определенные зоны модели.

В задаче исследования устойчивости выработки определяется статическое напряженно-деформированное состояние массива каменной соли с выработкой, при различных значениях внутреннего противодействия хранимого продукта. Определяются зоны предельного деформирования в потолочине в зависимости от противодействия хранимого продукта. Этот расчёт осуществляется с целью определения критических напряжений и деформаций в потолочине, при которых возможно обрушения свода, и соответственно потеря возможности доступа к продукту хранения.

В задаче заплывания исследуется уменьшение объема выработки в процессе циклической эксплуатации подземного хранилища из-за проявления массивом каменной соли свойств ползучести при изменении действующих на массив нагрузок - циклическом изменении давления хранимого продукта. Определяются деформации ползучести, возникшие в массиве, скорость деформаций ползучести, а так же объемные деформации массива, позволяющие оценить степень заплывания выработки.

Таким образом, используя описанную методику определения параметров материала из экспериментальных данных и методику моделирования различных этапов эксплуатации подземного хранилища, можно сделать вывод о возможности использования программного комплекса SIMULIA Abaqus для моделирования реальных объектов хранения с высокой степенью достоверности.