

0.1 Описание установки

Конструктивно установка для моделирования процессов в плоском коллекторе состоит из верхней и нижней крышек, в кольцевом углублении которых фиксируется боковина. Схематический внешний вид установки показан на рисунке 1. Между собой крышки скрепляются шестнадцатью шпильками, которые на рисунке не показаны. Толщина крышек составляет 75 мм при наружном диаметре 600 мм. Высота боковины равна 70 мм при внутреннем диаметре 430 мм и толщине стенки 25 мм.

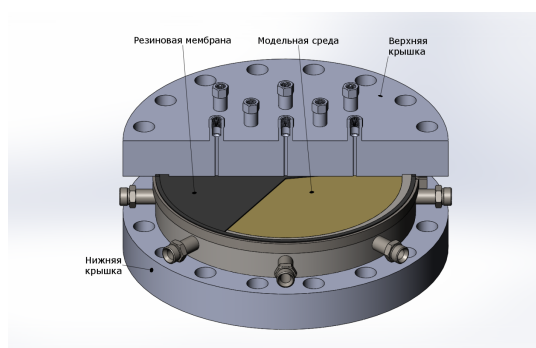


Рис. 1: Схема плоской модельной установки

Основные детали установки изготовлены из нержавеющей стали. Крышки размещаются на станине, что позволяет свободно их переворачивать и перемещать верхнюю крышку в свой ложемент. Это дает возможность проводить необходимые операции, связанные с подготовкой и проведением экспериментов, несмотря на значительную массу составных частей установки (масса крышек превышает 160 кг). Фотографии общего вида установки представлены на рисунках 2.



Рис. 2: Общий вид экспериментальной установки

Верхняя крышка отделена от модельной среды резиновой мембраной. По периметру мембраны расположены резиновое кольцо и опорный хомут, которые создают герметичное пространство между мембраной и крышкой (рис. 1). Это пространство заполняется водой под давлением, что позволяет моделировать литостатическое давление в модели коллектора. Давление над мембраной поддерживается при помощи разделительного цилиндра, верхняя часть которого заполнена сжатым азотом под необходимым давлением, а нижняя водой.

Горизонтальное нагружение модели обеспечивается с помощью герметичных камер, расположенных на поверхности боковой стенки. Фотография установки (вид сверху) с боковыми камерами представлен на рисунке 3. Камеры изготовлены из листовой меди толщиной 0,3 мм. Внутренняя полость камер имеет толщину 3 мм, высота камеры на 2 мм меньше высоты боковой стенки. Длина дуги камеры составляет примерно 80° . Патрубок камеры через герметичное уплотнение выводится из боковой стенки наружу. Камеры зафиксированы на боковой поверхности кольца с помощью силиконового герметика. Боковое нагружение осуществляется за счет закачки газа или жидкости в попарно противоположные камеры.



Рис. 3: Фотография установки: вид сверху

В обеих крышках и в боковине просверлены сквозные технологические отверстия диаметром 6 мм, оснащенные с внешней стороны приваренными резьбовыми штуцерами. В верхней крышке находится 29 отверстий, в нижней – 13, в боковине – 6. Эти отверстия могут использоваться как для монтажа различных датчиков, так и для обеспечения отбора или закачки флюида в коллектор. Поровое давление в модели измеряется через технологические отверстия, расположенные в нижней крышке установки, с помощью тензопреобразователей. Технологические отверстия заполняются водой и перед заливкой гипса закрываются поролоновыми вкладышами. Вкладыши на 4...5 мм выступают над поверхностью нижнего основания и после заливки гипса оказываются вмонтированы в него, обеспечивая передачу порового давления к тензопреобразователям. Схема расположения датчиков показана на рисунке 4.

Выбор среды, моделирующей коллектор, определяется постановкой решаемых экспериментальных задач. Помимо факторов, обусловленных критериями подобия, применение которых подробно описано в [?, ?], важнейшую роль играют технологические факторы, связанные с возможностью изготовления экспериментальных образцов. С этой точки зрения смесь на основе гипса с добавкой портландцемента является хорошим выбором. Хорошая текучесть смеси

и отсутствие усадки при затвердевании позволяет добиться плотного контакта со стенками установки. Для замедления схватывания гипса в воду для приготовления смеси добавляется лимонная кислота в концентрации 2 г/дм^3 . Описание экспериментов по определению прочностных и фильтрационных характеристик образца можно найти [?]

Вспомогательные скважины, необходимые для прокачки насыщенного раствора сульфата кальция (гипса) через образец и для создания поля порового давления в нем, формируются при отливке образца путем помещения в него заранее вставок из фторопласта диаметром 15 мм в центрально симметричные технологические отверстия (рис. 3). После затвердевания гипса вставки вынимаются, а сами образовавшиеся скважины закрываются фторопластовыми крышками.

Центральная скважина представляет собой латунную трубку диаметром 16 мм, которая герметично вставляется в нижнюю крышку установки. Трубка имеет возможность свободно вращаться вокруг вертикальной оси, позволяя ориентировать затравку трещины ГРП в заданном направлении. Верхний торец трубки закрыт винтовой пробкой. В средней части трубки проделана вертикальная прорезь, в которую вставляется сложенная вдвое тонкая латунная сетка, служащая затравкой трещины ГРП. Размер лепестков сетки составляет $8 \times 8 \text{ мм}$. Углы лепестков срезаны примерно на 2 мм. После заливки гипса мы получаем обсаженную скважину с перфорированной стенкой и затравкой трещины ГРП.

Эксперименты, как правило, проводились на третьи сутки после заливки гипса. После сборки экспериментальной установки модель нагружалась небольшим вертикальным давлением ($1 \dots 1,5 \text{ МПа}$), затем задавалось необходимое давление в боковых камерах. После этого вертикальное давление поднималось до рабочего значения. Перед началом эксперимента проводилось дополнительное насыщение гипсового образца жидкостью под постоянным давлением закачки около 1 МПа на технологической нагнетательной скважине. Критерием завершения процесса насыщения служили стабилизация расхода на добывающей скважине и давлений в точках измерения порового давления. По этим критериям насыщение продолжалось около 1 часа. Непосредственно после завершения процесса насыщения проводился эксперимент по ГРП.

0.2 Описание эксперимента. Постановка задачи

Эксперимент проводился без гидроразрыва пласта для проверки теории однофазной фильтрации на кривых падения давления. Для этого во вспомогательные скважины сначала закачивался растрор гипса с целью насыщения образца и создания в нем стационарного поля порового давления, после чего давление в нагнетательной скважине сбрасывалось. Соответственно поровое давление в датчиках начинало спадать, и это фиксировалось в течение всего процесса падения давления. Давления в датчиках записывались каждые 0.01 секунды.

Для создания этого эксперимента перед заливкой гипса на дно установки фиксировались вспомогательные скважины в точках с координатами $[(0.057, 0.127), (-0.057, -0.127)]$ и центральная скважина. На дно установки монтировались датчики давления согласно рисунку 4 в точках с координатами $[(0.057, -0.127), (0.07, 0.0), (-0.057, 0.127), (0.0, 0.127), (0.0, -0.185), (0.065, 0.065), (-0.121, 0.121), (0.0, 0.07), (0.121, 0.121), (0.127, 0.0), (0.0, -0.07), (0.0, 0.0), (-0.185, 0.0)]$. Измеренное в датчиках давление соответствовало давлению на расстоянии 4 мм от дна образца. Далее заливался гипс и высушивался в течение 2-3 дней. После затвердевания образца вспомогательные боковые скважины удалялись. Далее, как упоминалось выше, сверху

на образец подавалось давление (20 атм), имитируя литостатическое давление. Давление в боковых камерах не задавалось. После этого во вспомогательную скважину с координатами центра (0.057, 0.127) и радиусом 7.5 мм закачивался раствор гипса с постоянным давлением (14.5 атм). Другая скважина была соединена с атмосферой. Насыщение образца продолжалось до установления в нем стационарного режима. Установление режима определялось по давлению в центре (0, 0). Когда давление в ней достигало значения, равного полусумме давлений, заданных в боковых скважинах, и переставало меняться. После этого давление в нагнетательной скважине сбрасывалось. Кривые давления в датчиках порового давления фиксировались в течение всего эксперимента (рисунок 5). Длительность всего эксперимента составила примерно 220 мин. Создание стационарного режима в образце заняло примерно 150 мин. Далее давление сбрасывалось.

0.3 Постановка задачи: граничные условия для задачи упругости

На верхнюю поверхность образца прикладывалась вертикальная нагрузка перпендикулярно поверхности, поэтому вектор приложенной силы равен нормальной компоненте силы: $\mathbf{f} = \mathbf{f}_n = \sigma_n * \mathbf{n}$, где $\sigma_n = P_{top}$. Следовательно, на верхнюю поверхность ставится граничное условие Неймана на нормальное напряжение, равное вертикальной нагрузке: $\sigma_n = P_{top} = 20 \text{ atm}$.

Нижняя крышка установки зафиксирована жестко по вертикали, следовательно нижняя поверхность образца не может перемещаться вдоль оси Z под действием вертикальной нагрузки. Таким образом, на низ образца ставится граничное условие Дирихле на перемещение (нулевое) по оси Z: $u_z = 0$.

После высыхания гипса в установке между образцом и установкой нет жесткого сцепления, которое не давало бы деформироваться образцу при заданной вертикальной нагрузке. Поэтому боковую поверхность образца считаем свободной. И на нее задаем граничное условие Неймана на нормальное напряжение: $\sigma_n = 0$.

Перечисленные граничные условия не исключают поворота образца вокруг своей оси и сдвига образца в плоскости XY. Для исключения таких перемещений можно поставить граничное условие Дирихле на всю боковую поверхность образца в виде нулевого касательного перемещения в плоскости XY: $\mathbf{u} * \mathbf{e}_\tau = 0$, где $\mathbf{u} = (u_x, u_y)$, $\mathbf{e}_\tau = (-n_y, n_x)$. То есть, граничное условие может быть переписано в виде: $-n_y * u_x + n_x * u_y = 0$

Так же к граничным условиям для задачи упругости необходимо добавить условия на вспомогательные скважины, которые следуют из того факта, что в нагнетательную скважину закачивается жидкость под давлением, а добывающая связана с атмосферой. Таким образом, на скважины необходимо поставить условие Неймана на нормальные напряжения. На нагнетательную: $\sigma_n = 14.5 \text{ atm}$; на добывающую: $\sigma_n = 1 \text{ atm}$.

0.4 Постановка задачи: граничные условия на фильтрацию

На верхнюю, нижнюю, боковую поверхности образца ставится условие непротекания. Это условие означает нулевой поток через данные поверхности, который, в свою очередь линейно зависит от градиента давления. То есть, граничное условие представляет собой условие Неймана на давление: $\frac{\partial P}{\partial \mathbf{n}} = 0$

На вспомогательные скважины в течение всего эксперимента задаются постоянные давления: в нагнетательную скважину сначала закачивается раствор гипса под давлением 14.5 атм,

а после установления стационарного режима давление сбрасывается до 1 атм, а добывающая скважина изначально связана с атмосферой. Таким образом, на всю поверхность скважины ставятся граничные условия Дирихле на давление. На нагнетательную скважину с координатами $(0.057, 0.127)$: $P = 14.5 \text{ atm}$ до достижения стационарного режима, далее $P = 1 \text{ atm}$ до конца эксперимента; на добывающую скважину с координатами $(-0.057, -0.127)$: $P = 1 \text{ atm}$ в течение всего эксперимента.

0.5 Результаты эксперимента

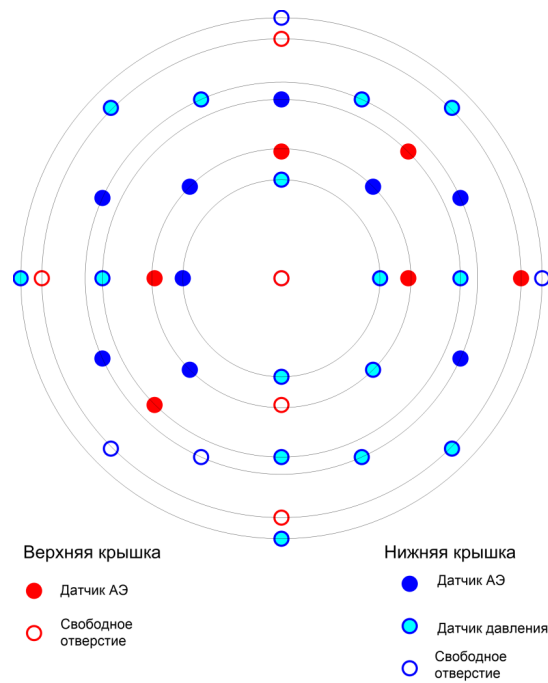


Рис. 4: Схема расположения датчиков в нижней и верхней крышках

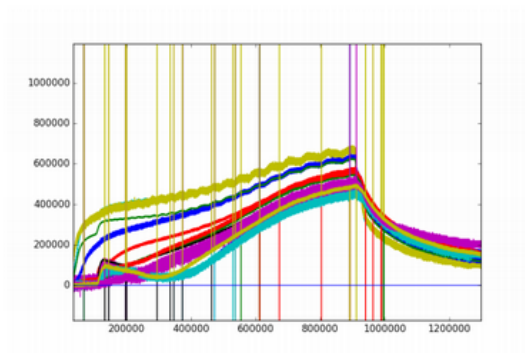


Рис. 5: Кривые давления в датчиках порового давления