

техногенных грунтов – отходов производства в дорожном строительстве (Дипломная работа). М., 2006.

5. Строкова В. В. Грунтобетоны на основе глинистых пород КМА для дорожного строительства: Монография / В. В. Строкова, А. Ф. Щеглов. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2003. 152 с.

ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТЫХ ПОРОД ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА

Калиниченко Ирина Владиславовна

Геологического ф-т МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва,

kalinichenko-i@yandex.ru

Для качественного и бесперебойного функционирования системы газоснабжения необходимо соорудить достаточно большое количество подземных хранилищ газа (ПХГ) на протяжении всей длины трубопровода. Они обеспечивают равномерную подачу газа с учетом суточной и сезонной неравномерности потребления, а так же позволяют создавать долгосрочные запасы газа стратегического и катастрофического назначения. Наиболее простым с точки зрения финансовых затрат и поиска подходящих геологических условий для создания ПХГ является вариант сооружения резервуаров в пористых породах-коллекторах (водонасыщенных пластах и отработанных месторождениях углеводородов). Поэтому самыми распространенными хранилищами в мире и на территории РФ, в частности, являются ПХГ в терригенных породах (песках и песчаниках).

Особенностью работы подземных хранилищ является постоянная смена периодов отбора и нагнетания хранимого продукта (соответственно минимального и максимального противодавлений) в течение многолетней эксплуатации. В результате происходит перераспределение поровой среды, разрушение первоначальной структуры песчаника и образование новой более плотной, за счет чего пористость и активный объем хранилища должны уменьшаться. Проверить данное предположение позволяет проведение серии экспериментов в лабораторных условиях на песчаниках (или их моделях) при давлениях и условиях, максимально близких к реально существующим на глубине при работе ПХГ.

Экспериментальные работы велись на уникальной установке компрессионного сжатия УКС, сконструированной специально для подобных задач ФГУГП ВНИМИ. Она позволяет проводить испытания по определению поведения пород в условиях всестороннего сжатия и создавать внутри образца поровое давление и управлять им отдельно от осевого и бокового. Это даёт

возможность моделирования различных геомеханических процессов, характерных для реальных коллекторов на глубине.

Как правило, породы-коллектора, образующие резервуары, представлены песчаниками кварцево-полевошпатовыми средне- и мелкозернистыми, с карбонатным или глинистым цементом, пористостью порядка 20-30% и прочностью на одноосное сжатие от нескольких до 20 МПа. В качестве материала для исследования было принято решение использовать модельные образцы песчаников, искусственно сцементированные (10 и 20 % цемента), поскольку принципиальным было получение качественной картины протекающих в рамках эксплуатации резервуаров процессов. Модельные образцы обладают более равномерным идентичным друг другу строением и большей пористостью, что обеспечивает возможность достаточно значительного роста деформаций в ходе испытаний. Использовались образцы искусственных песчаников кварцевого состава с пористостью от 30 до 42 % и прочностью на одноосное сжатие в 3-5 МПа. Испытания проводились на двух сериях образцов с 10 и 20 % цемента.

Для экспериментов был выбран вариант контролируемых дренируемых испытаний. Образец (цилиндр с высотой 5,5 см и диаметром 4,2 см) в герметичной оболочке помещался в камеру прибора и подвергался равномерному всестороннему внешнему нагружению. Осевая нагрузка примерно равнялась боковой, на 5 % превосходила поровое давление и составляла 22-30 МПа (нагрузка, испытываемая породами на глубине заложения хранилищ). Это значение поддерживалось на протяжении всего эксперимента. Для имитации смены циклов отбора - заполнения газом в ходе эксплуатации резервуара при постоянном гидростатическом давлении поровое (а соответственно и эффективное давление) изменяли от 10 до 20-22 МПа. Количество циклов менялось в каждом конкретном эксперименте, но в среднем составляло от 7 до 12-15. Методика эксперимента была аналогичной как для образцов с 10 % цемента, так и с 20 %. Схема испытания проиллюстрирована на рис. 1, приведенном ниже, для одного из образцов, но она является общей и повторяется для остальных разновидностей.

В процессе испытаний измерялись продольные и поперечные деформации образца, что позволяло в любой момент оценить объемную деформацию в зависимости от действующих напряжений на образец. Результаты одного из экспериментов представлены на рис. 2. После этого, на основании нижеприведенной формулы через данные об объемной деформации ϵ_v , общем объеме грунта V_1 и объеме скелета грунта $V_{ск}$ получали значения новой пористости:

$$n_i = \frac{V_1(1 - e_v) - V_{ск}}{V_i} = 1 - \frac{V_{ск}}{V_i}$$

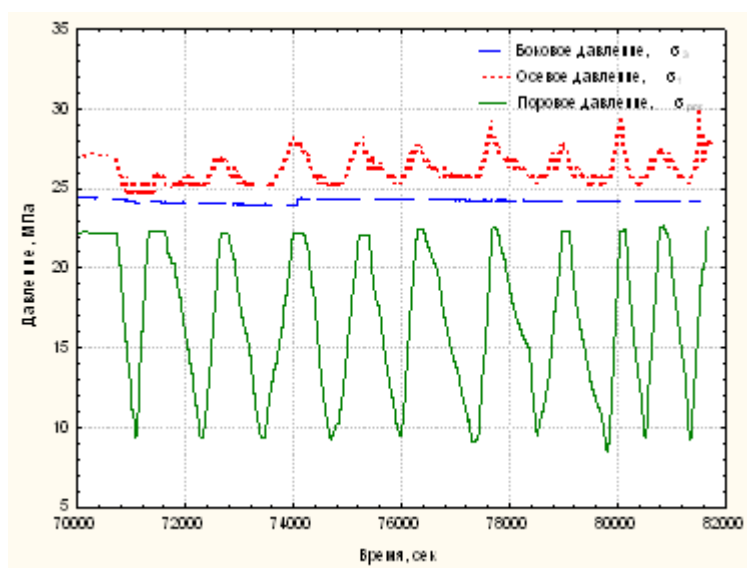


Рис. 1. Схема испытания.

Результаты, полученные в результате расчета, представлены на рис. 3, на нем наглядно показано уменьшение пористости в ходе циклических экспериментов. За весь эксперимент за счет циклического изменения порового давления пористость образца уменьшилась на 4 % (не считая первоначального обжата). Рост остаточных объемных деформаций свидетельствует о необратимости данных изменений поровой среды.

Помимо механических испытаний для доказательства предположения об образовании необратимых деформаций и уменьшении пористости породы в ходе циклически изменяющегося порового давления было проведено исследование с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO 1450VP.

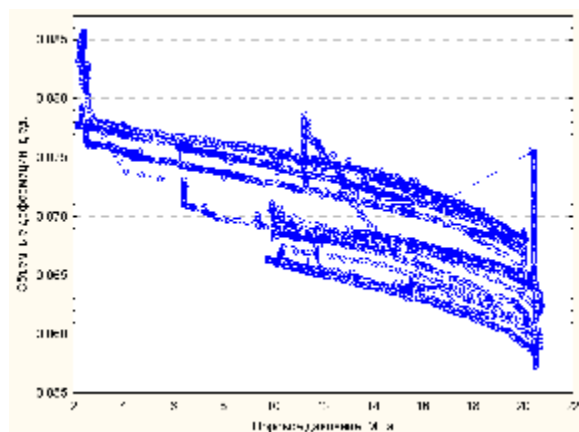


Рис. 2. График зависимости между объемными деформациями и эффективным напряжением для образца с 10% цемента.

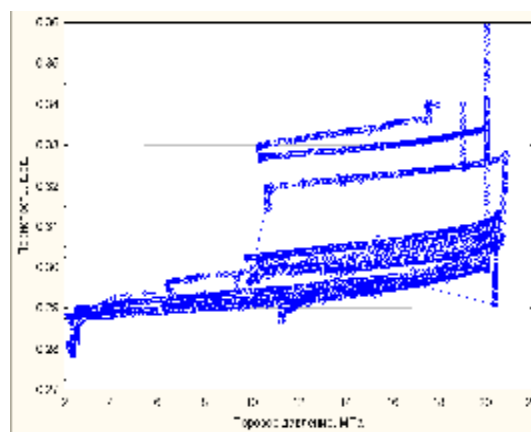


Рис. 3. График зависимости между пористостью и поровым давлением.

Изучение микроструктуры порового пространства искусственных песчаников до и после проведенных на них испытаний (изначально фрагментов

одного и того же образца) проводилось на кафедре инженерной и экологической геологии МГУ им. М.В.Ломоносова д. г.-м. н. В.Н. Соколовым. Было сделано несколько серий разномасштабных фотографий для песчаников до и после испытаний. Наиболее показательные кадры для обоих вариантов приведены на рис. 4. До испытания между крупными зернами песка видны большие поры и соединяющие их узкие поровые каналы. Цементирующее вещество встречается в виде корок на песчаных частицах и в виде игольчатых пучков, расположенных непосредственно на поверхности зерен. На второй фотографии (рис. 4, б) представлен кадр с таким же масштабом фрагмента песчаника после опыта. Видно большое количество трещин, образовавшихся в цементной корке, покрывающей кварцевые зерна после проведенных испытаний. Для большей наглядности трещины выделены светлыми овалами. Они расположены в случайном порядке, что свидетельствует о том, что в ходе эксперимента каких-либо однозначных направлений действия напряжений не было, и исходная среда была достаточно однородной. Анализ фотографий с большими увеличениями выявил то, что в результате испытаний тонкоигольчатое цементирующее вещество повреждено и перемято.

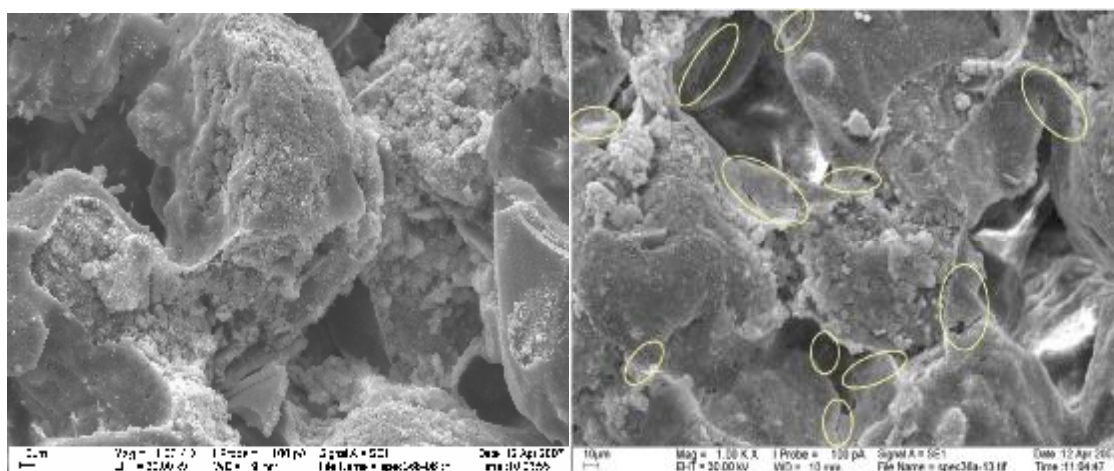


Рис. 4. Структура искусственного песчаника: а - до испытаний (увел. 1000 раз); б - после испытаний (увел. 1000 раз).

С помощью программного комплекса STIMAN (Structure Image Analyses) проведен анализ структуры порового пространства искусственного песчаника, до и после циклов нагружения. По расчетам - начальная общая пористость исследуемого образца 41,78%, а удельная поверхность 2,36 1/мкм; после испытания значения изменились и стали соответственно - 37,21% и 3,82 1/мкм. Причем, уменьшение произошло, прежде всего, за счет сокращения числа пор наибольшего диаметра. Количество же самых тонких пор и поровых каналов относительно значения общей пористости возросло. Следовательно, несмотря на образование большого количества трещин в породе, проницаемость материала должна уменьшиться, что подтверждают расчеты.

Помимо описанных экспериментов, в рамках доказательства рассматриваемого предположения также были проведены испытания искусственных образцов песчаников, созданных с добавлением 20% цемента. Они обладали большей прочностью и меньшей пористостью. Методика испытаний аналогична для 10%. В результате были получены данные по изменению объемных деформаций (рис. 5), произведены расчеты по вышеприведенной формуле. Эксперимент показал, что несмотря на большую прочность исходного материала, проявляются те же самые зависимости, что были замечены выше, правда, меньшие по амплитуде. Объемные деформации уменьшились на 0,06 д.ед. за весь эксперимент, пористость меньше чем на процент.

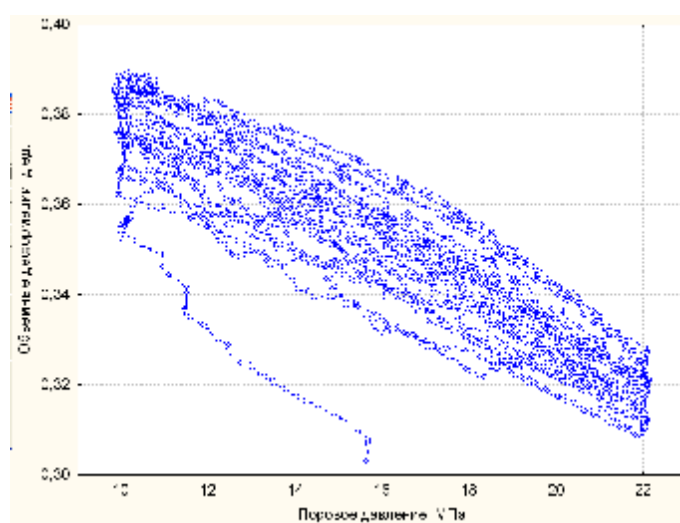


Рис. 5. График зависимости объемных деформаций от порового давления для образца с 20 % цемента.

Проведенные исследования показали, что в результате циклического режима работы коллектора произошли серьезные изменения поровой среды: уменьшилась пористость (на 1-3 % в зависимости от длительности опыта); существенно выросли объемные деформации (на 0,03-0,06 д.ед.); появились остаточные деформации. Полученные значения небольшие по абсолютным величинам, но в рамках природного коллектора достаточно значительны и могут существенно сказаться на изменении активного объема резервуара в ходе его эксплуатации.

Исследование строения порового пространства модельных образцов с помощью микроструктурного анализа и обработка полученных данных показали, что в ходе циклической нагрузки-разгрузки породы происходит деформация и разрушение цементирующего вещества, что ведет к уменьшению пористости и проницаемости породы-коллектора.