

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИНЪЕЦИРОВАНИИ ГРУНТОВ

ВОЗНЕСЕНСКАЯ Е.С.

Доцент кафедры общей и строительной физики Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), к.т.н., г. Санкт-Петербург

ELVOZN@yandex.ru

ОСОКИН А.И.

Генеральный директор ЗАО «Геострой», к.т.н., г. Санкт-Петербург

info@geostroy.ru

ТАТАРИНОВ С.В.

Генеральный директор ООО «Бюро экспертизы и совершенствования проектных решений» (ООО «БЭиСПР»), к.т.н., г. Санкт-Петербург

bspr-spb@yandex.ru

ЕРМОЛАЕВ В.А.

Технический директор ЗАО «Геострой», г. Санкт-Петербург

ermolaevvadim@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены результаты натуральных наблюдений за изменениями порового давления при инъекционном упрочнении грунта основания в режиме гидроразрыва. Сопоставление результатов натуральных исследований и численного моделирования напряженно-деформированного состояния грунта при инъектировании с использованием манжетной технологии подтверждает достаточную надежность результатов моделирования

Ключевые слова

Слабые водонасыщенные грунты; упрочнение; инъектирование; режим гидроразрыва; манжетная технология инъектирования; изменения напряженно-деформированного состояния

Введение

При решении целого ряда геотехнических задач возникает необходимость использования манжетной технологии инъекционного упрочнения грунтов оснований зданий и сооружений в режиме гидроразрыва. Однако до настоящего времени применение манжетной технологии в слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах недостаточно изучено и осуществляется во многом интуитивно.

Исследования зависимости процесса упрочнения грунтов при инъектировании в режиме гидроразрыва от параметров нагнетания раствора являются особо актуальными, так как позволяют выработать оптимальные технологические режимы инъектирования.

Целью работы, которая выносится на обсуждение, являлось проведение натуральных исследований изменений порового давления при инъектировании закрепляющего раствора в грунт методом гидроразрыва и сопоставление полученных данных с результатами численного моделирования напряженно-деформированного состояния этого грунта с помощью программы PLAXIS.

Методика натурных исследований

При выполнении работ по усилению оснований фундаментов производственных зданий на проезде Обуховской обороны (д. 120) в г. Санкт-Петербурге, реконструируемых под общественно-деловой центр, была предусмотрена организация опытной площадки для проведения исследований изменений порового давления при инъецировании в грунт основания цементного раствора по манжетной технологии (методом гидроразрыва).

Было сделано восемь инъекционных скважин глубиной по 7 м. В центре опытного участка было установлено два датчика порового давления (стандартных струнных пьезометра) на глубине 4 и 6 м. Давление поровой воды, воздействуя на диафрагму струнного датчика, заставляет ее изгибаться, изменяя натяжение струны и ее резонансную частоту. Возбуждая колебания струны на резонансной частоте в магнитном поле и фиксируя возникающий при этом переменный ток, можно точно измерить период колебаний.

Математически зависимость между частотой колебаний натянутой струны и силой натяжения может быть представлена как зависимость между квадратом значения частоты и значением силы. Пересчет из «периодических» в «линейные» единицы можно провести с помощью линейного или полиномиального уравнения. В данном случае при обработке результатов были использованы линейные единицы.

Пьезометры были установлены в скважину в точном соответствии с рекомендациями, приведенными в руководстве пользователя. В соответствии с рекомендациями изменения температуры и атмосферного давления в расчет не принимались.

Слабые грунты основания опытной площадки представлены суглинками текучими с примесью органики со следующими характеристиками: плотность грунта - 17,0 кН/м³; плотность сухого грунта - 12,5 кН/м³; коэффициент фильтрации - 0,001 м/сут; модуль деформации - 3 МПа; коэффициент Пуассона - 0,35; сцепление - 0,11 МПа (по второй группе предельных состояний); угол внутреннего трения - 7°. Уровень грунтовых вод - 0,75 м. Начиная с глубины 10 м залегают суглинки тугопластичные и полутвердые с модулем деформации более 14 МПа.

Датчики порового давления расположены в центре опытного участка, поэтому расстояние от каждой инъекционной скважины до датчиков приблизительно одинаково и составляет 1,5-1,6 м. Закачка упрочняющего раствора в скважины производилась последовательно. Таким образом, датчики фиксировали относительное изменение порового давления на глубине 4 и 6 м при инъецировании в каждую скважину.

Результаты натурных исследований

Полученные результаты исследований изменений порового давления при закачке раствора представлены в данной работе на примере двух характерных инъекционных скважин - В5 и В4.

Первоначально закачка раствора в скважину В5 осуществлялась в один горизонт на глубине 3 м. Датчики 1 и 2 располагались на расстоянии 1,6 м от скважины. Характер изменений порового давления на глубине 4 и 6 м показан на рис. 1, 2. Следует отметить, что на представленных графиках поровое давление принято отрицательным для удобства сопоставления полученных данных с результатами численных расчетов с помощью программы PLAXIS, в которой во всех случаях выходные сжимающие напряжения и силы, включая поровое давление, считаются отрицательными.

На глубине 4 м природное поровое давление составляет 32,5 кПа, на глубине 6 м - 52,5 кПа. Начало закачки раствора на представленных графиках приблизительно соответствует моменту времени 13 мин. Наблюдается повышение порового давления при инъецировании до значений 55,7 кПа на глубине 4 м и 66,1 кПа на глубине 6 м. Окончание закачки раствора соответствует моменту времени 20 мин., то есть максимальным значениям порового давления. Далее в течение следующих 25 минут наблюдений избыточное поровое давление практически рассеивается. При нагнетании раствора в горизонт на глубине 3 м изменение порового давления на глубине 6 м незначительно отстает во времени от изменения давления воды на глубине 4 м, что представляется логичным.

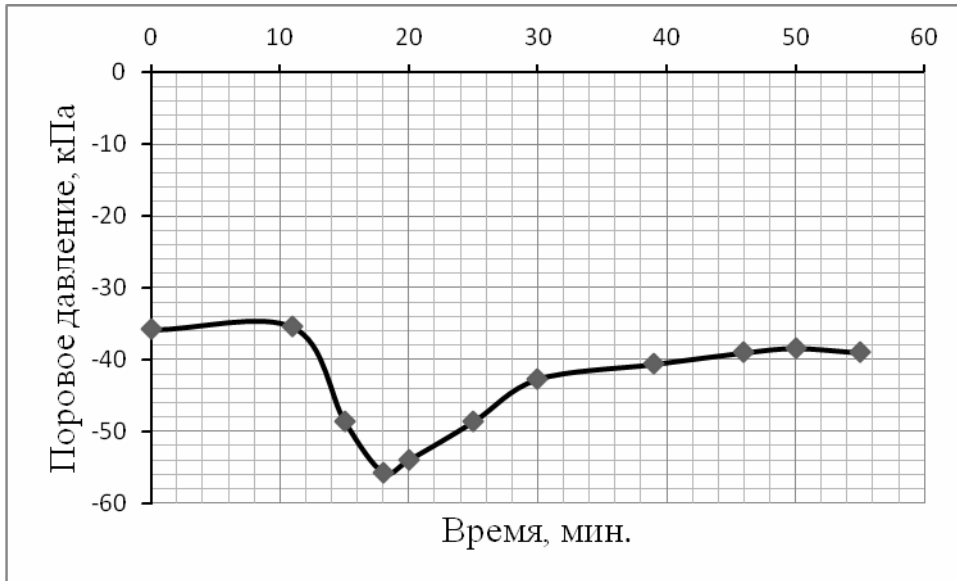


Рис. 1. Изменение порового давления на глубине 4 м (по данным датчика 1) при закачке раствора в скважину В5 в горизонт 3 м

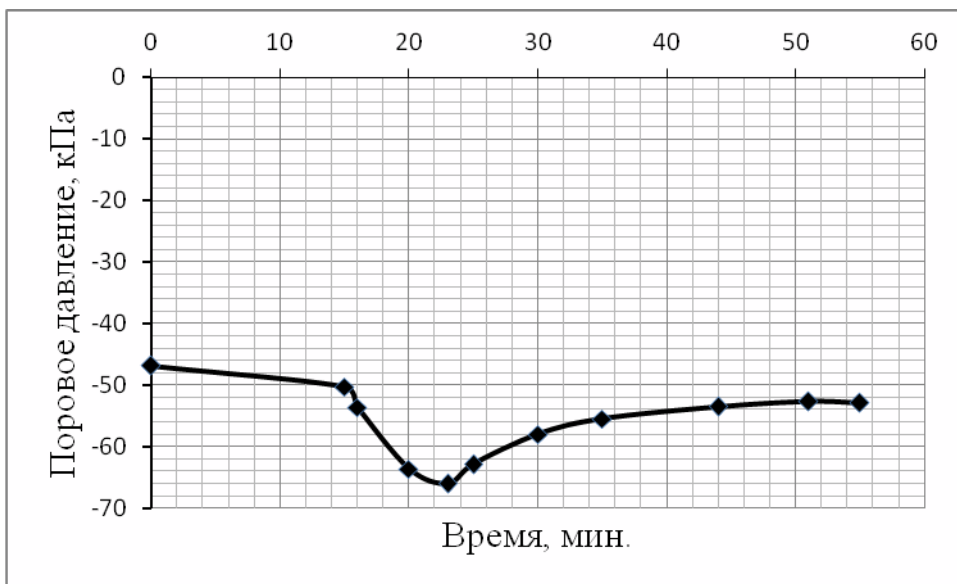


Рис. 2. Изменение порового давления на глубине 6 м (по данным датчика 2) при закачке раствора в скважину В5 в горизонт 3 м

Закачка раствора в скважину В4 производилась в восемь горизонтов снизу вверх на глубине от 6,5 до 3,2 м в течение 2 ч. Затем работы были остановлены на 19 ч. Продолжительность инъецирования в каждый горизонт составляла 5-10 мин., и 5-10 мин. требовалось для перехода к следующему горизонту. Характер изменений порового давления в процессе закачки на глубине 4 и 6 м представлен на рис. 3, 4.

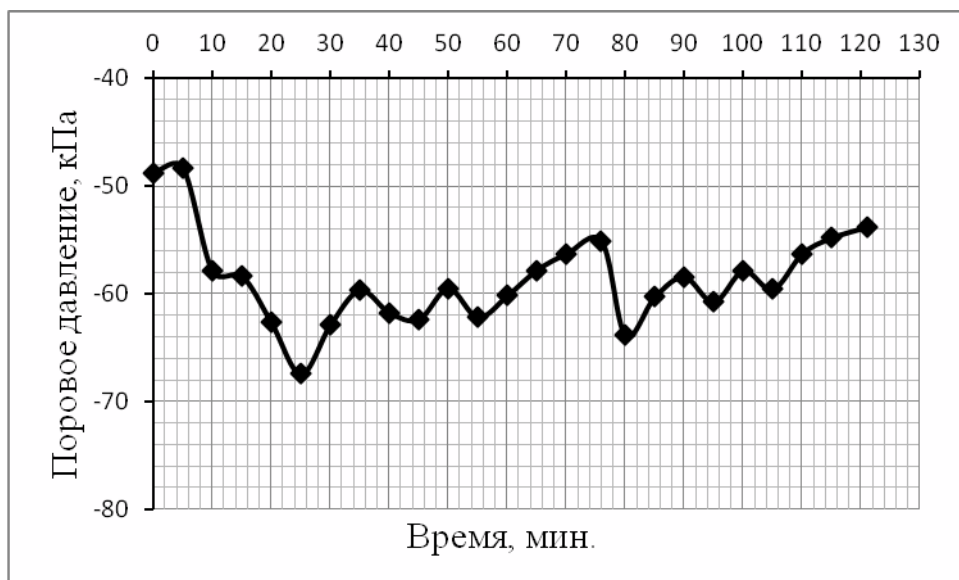


Рис. 3. Изменение порового давления на глубине 4 м (по данным датчика 1) при закачке раствора в скважину В4 в горизонты от 6,5 до 3,2 м

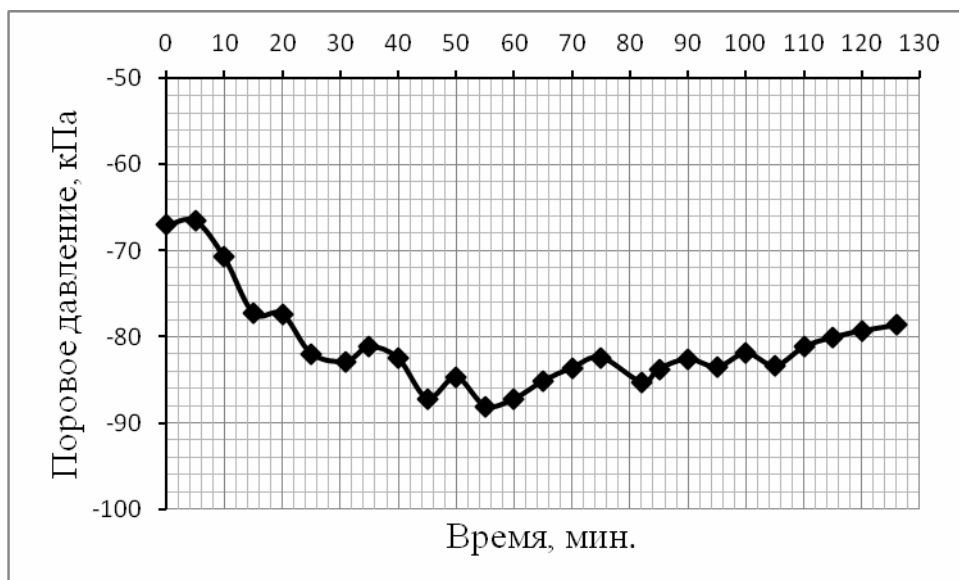


Рис. 4. Изменение порового давления на глубине 6 м (по данным датчика 2) при закачке раствора в скважину В4 в горизонты от 6,5 до 3,2 м

На глубине 4 м начальное поровое давление составляет 48,3 кПа, на глубине 6 м - 66,5 кПа. В данном случае наблюдается повышенное на 14-16 кПа (относительно природного) начальное поровое давление вследствие предыдущих инъекций в скважины Н1 и Н2, расположенные с противоположной стороны от датчиков. Начало закачки раствора на указанных графиках приблизительно соответствует моменту времени 5 мин.

Наблюдаются последовательные «ступенчатые» повышения порового давления, соответствующие инъекциям в отдельные горизонты, за которыми следуют понижения, связанные с рассеянием избыточных поровых давлений при снятии нагрузки при подъеме снаряда.

Общее повышение порового давления при инъецировании составляет 19 кПа на глубине 4 м и 22 кПа на глубине 6 м. Максимальное значение порового давления на глубине 4 м достигается приблизительно через 20-25 мин. после начала при закачке раствора в горизонт на глубине 5,7 м

(см. рис. 3). На глубине 6 м поровое давление растет в течение приблизительно 50 мин. (см. рис. 4) и достигает максимального значения при закачке в горизонт на глубине 4,9 м.

На рисунках 5, 6 показано рассеивание избыточного порового давления в течение 19 ч после окончания инъецирования. На глубине 6 м избыточное поровое давление практически рассеивается. Поровое давление достигает значения 57,8 кПа, что приближается к природному (52,5 кПа).

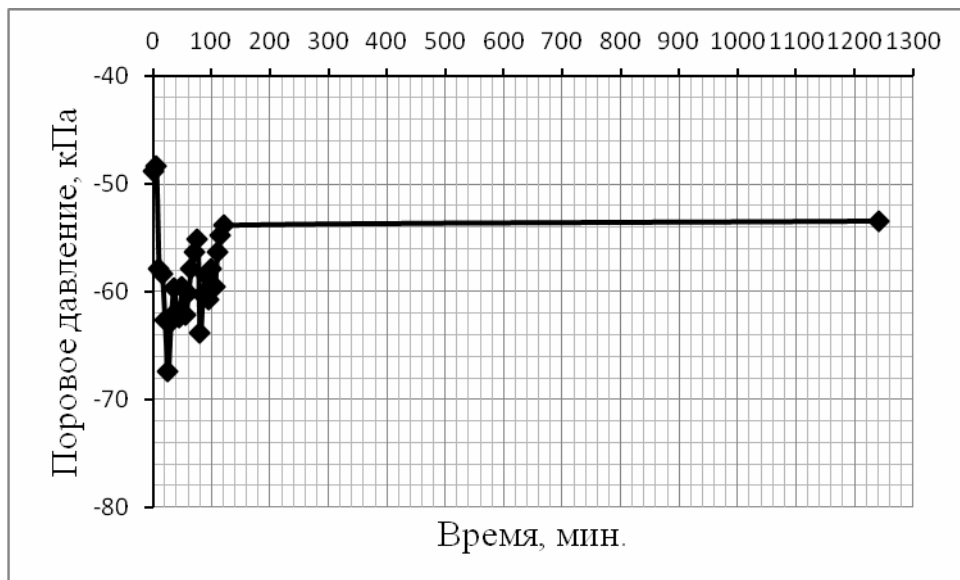


Рис. 5. Рассеивание порового давления на глубине 4 м (по данным датчика 1) после закачки раствора в скважину В4

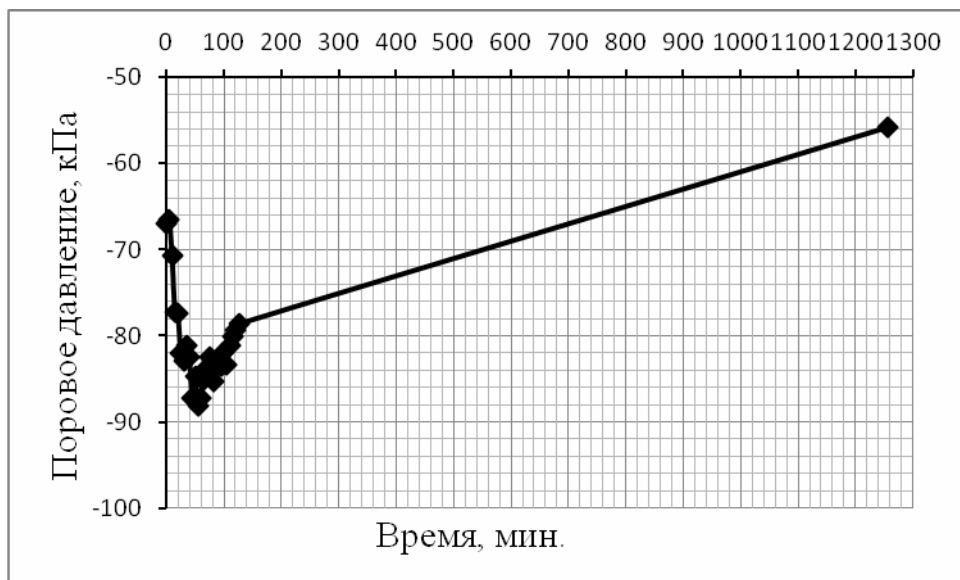


Рис. 6. Рассеивание порового давления на глубине 6 м (по данным датчика 2) после закачки раствора в скважину В4

На глубине 4 м рассеивание избыточного порового давления за время наблюдения незначительно, что, очевидно, связано с отжатием воды вверх при консолидации грунта основания при инъецировании.

Методика численного моделирования

При моделировании напряженно-деформированного состояния грунта основания при инъецировании использовалась программа PLAXIS. Рассматривалась осесимметричная задача с использованием 15-узловых треугольных элементов. В качестве модели уплотняемого грунта использовалась простейшая модель Мора - Кулона.

Слои прочного грунта, залегающие на глубине более 10 м, при расчете не учитывались. На поверхности грунта предполагалось наличие пригрузки, исключавшей подъем поверхности при инъецировании. Рассматривалась область радиусом 1,6 м, по оси которой расположен иньектор. Инъецирование производилось в каждый горизонт последовательно снизу вверх. Предполагалось, что в радиальном направлении разрыв распространяется, по крайней мере, до границы рассматриваемой области. Давление раствора, а следовательно, и раскрытие трещины уменьшается по мере удаления от иньектора. Разрыв заполняется раствором под давлением, в результате чего полость расширяется. При приложении давления раствора по контуру трещины оно в первый момент практически полностью передается на воду, поровое давление мгновенно повышается. Затем расширение полости, заполняемой раствором, продолжается, происходит выдавливание воды вверх и частично вниз от трещины, избыточное поровое давление постепенно рассеивается, грунт при этом уплотняется в процессе консолидации. При моделировании на каждом горизонте давление раствора прикладывалось в две ступени, на каждой выполнялся расчет мгновенного напряженно-деформированного состояния грунта, а затем - расчет консолидации грунта. Время консолидации на каждом горизонте принималось в соответствии с журналом выполнения работ по инъецированию.

Результаты численного моделирования

При расчете напряженно-деформированного состояния грунта основания при закачке раствора в скважину В5 моделировался один разрыв (горизонт на глубине 3 м). Полученные кривые изменений порового давления в точках *A* и *B*, расположенных на расстоянии 1,6 м от иньектора и на глубине 4 и 6 м соответственно, представлены на рисунке 7.

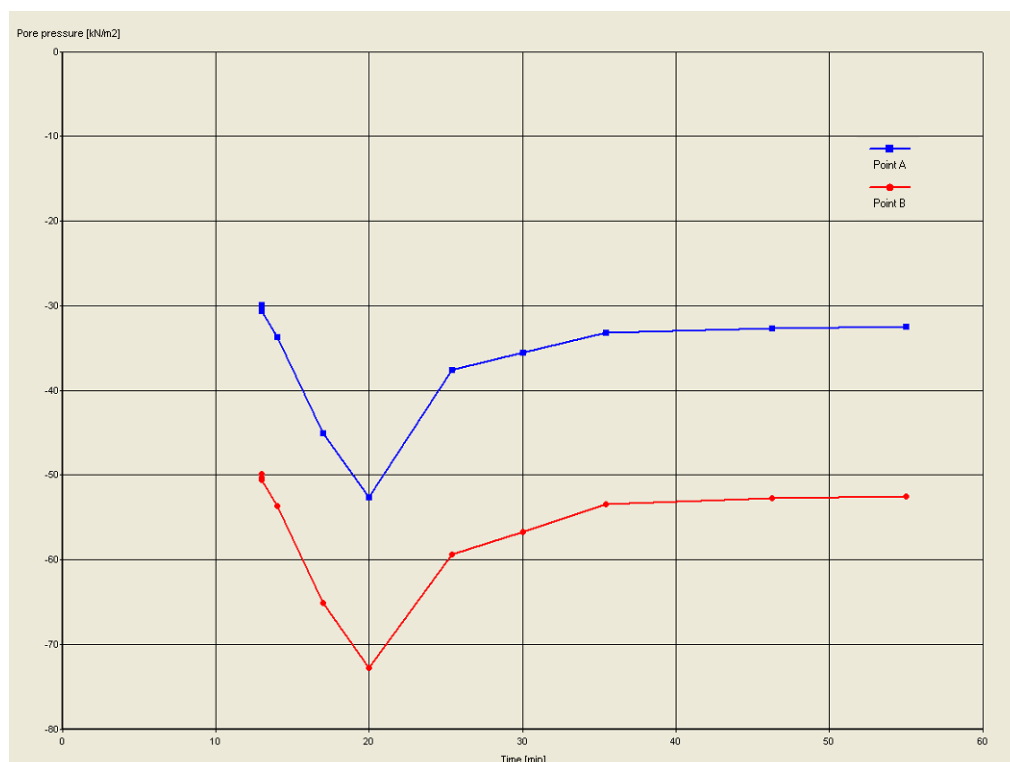


Рис. 7. Результаты моделирования изменений порового давления в точках *A* и *B*, расположенных на расстоянии 1,6 м от иньекционной скважины В5 на глубине соответственно 4 и 6 м, при закачке раствора в горизонт 3 м

В соответствии с выполненными расчетами поровое давление достигает максимальных значений 52,7 кПа на глубине 4 м и 72,8 кПа на глубине 6 м. В течение следующих 15-20 минут избыточное поровое давление рассеивается, достигаются значения природных поровых давлений. Полученные результаты расчетов вполне соответствуют результатам натурных измерений.

При расчете напряженно-деформированного состояния грунта основания при закачке раствора в скважину В4 моделировались восемь разрывов (горизонты на глубине 6,5; 6,1; 5,7; 5,3; 4,9; 3,8; 3,5 и 3,2 м). Полученные результаты представлены на рис. 8, 9.

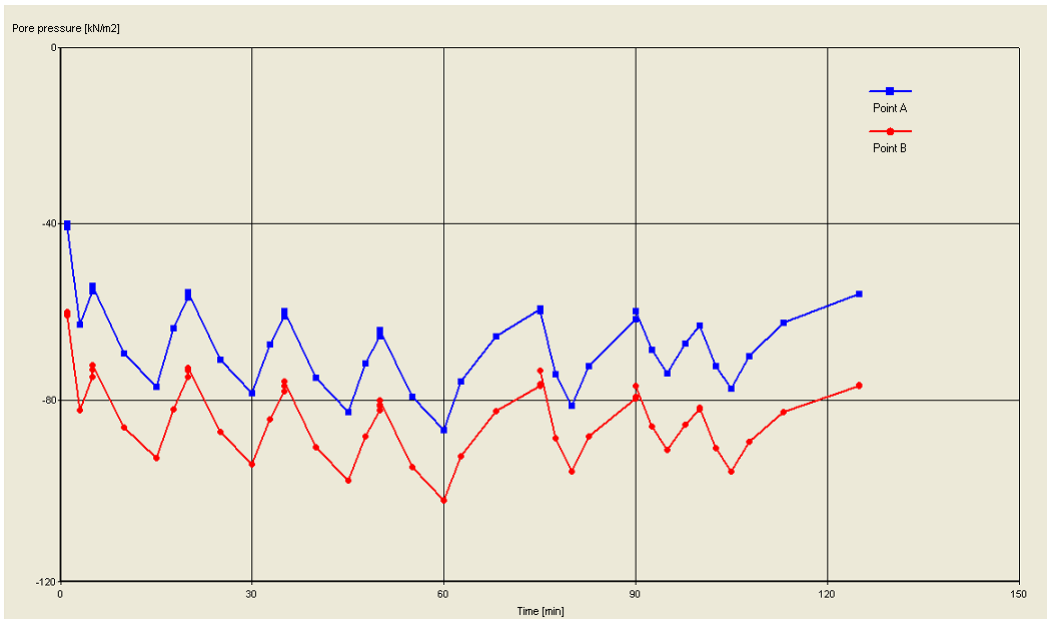


Рис. 8. Результаты моделирования изменений порового давления в точках *A* и *B*, расположенных на расстоянии 1,6 м от инъекционной скважины В4 на глубине соответственно 4 и 6 м, при закачке раствора в горизонты от 6,5 м до 3,2 м

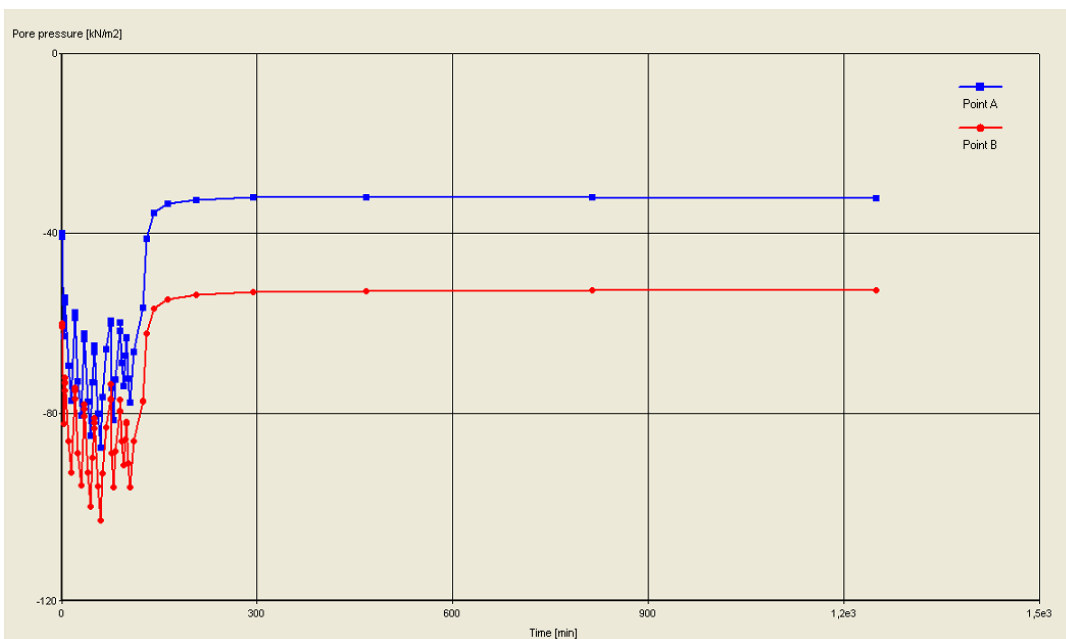


Рис. 9. Результаты моделирования рассеивания порового давления в точках *A* и *B* после закачки раствора в скважину В4

В данном случае повышения порового давления, соответствующие инъекциям в отдельные горизонты, несколько превышают экспериментальные значения. Однако величины порового давления, полученные в результате расчетов процессов консолидации грунта при закачке раствора в каждый горизонт, являющиеся начальными значениями перед инжектированием в следующий горизонт, хорошо согласуются с опытными данными. Так, например, по окончании закачки раствора в скважину В4 в момент времени 120 мин. экспериментальные значения порового давления составляют 53,8 кПа на глубине 4 м и 78,6 кПа на глубине 6 м (см. рис. 3, 4). Соответствующие значения, полученные в результате расчетов, составили: 56,0 кПа на глубине 4 м; 76,7 кПа на глубине 6 м (см. рис. 8).

В соответствии с результатами расчетов консолидации грунта в течении 19 ч после окончания инжектирования в скважину В4 (см. рис. 9), избыточные поровые давления в рассматриваемых точках А и В исчезают уже через 2,5 ч (160 мин.). Следует отметить, что в точках, расположенных ближе к инъектору, этот процесс занимает существенно большее время. К моменту снятия последнего отсчета значение порового давления на глубине 6 м соответствует природному (см. рис. 6). Динамика процесса рассеивания порового давления, к сожалению, не была зафиксирована.

Заключение

Сопоставление результатов натурных исследований и численного моделирования изменений порового давления при инжектировании с использованием манжетной технологии в целом показывает их сходимость. Это подтверждает достаточную надежность результатов моделирования и возможность их использования при прогнозировании напряженно-деформированного состояния грунта основания при инжектировании и при выборе необходимых параметров нагнетания раствора (давления и времени нагнетания) перед началом выполнения работ.

Список литературы

1. Вознесенская Е.С., Осокин А.И., Татаринцов С.В., Ермолаев В.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния водонасыщенного суглинка при инжектировании // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 6. 2008. С. 48-51.
2. Вознесенская Е.С., Осокин А.И., Татаринцов С.В., Ермолаев В.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния грунта основания при инжектировании методом гидроразрыва на примере результатов работ, выполненных по одному из объектов ЗАО «Геострой» // Труды международной конференции по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов», г. Москва, 7-10 июня 2010 г. Т. 5. С. 1641-1646.

Выходные данные: Журнал «Инженерные изыскания», №7/2013, С. 68-73