

УДК 554.32:556.332

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ИНВЕРСИОННОЙ РЕАКЦИИ ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИХ СКВАЖИН НА ВОЗМУЩЕНИЕ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

**А.М. ГУМЕН**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П.О.Сухого, Республика Беларусь*

К настоящему времени накоплен немалый опыт использования специализированных гидрогеодинамических наблюдений в пьезометрических скважинах для контроля изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды при решении самых разнообразных задач современной геодинамики. Однако чаще всего при попытке интерпретации аномальных изменений гидрогеодинамических показателей (уровня жидкости в скважине, пластового давления, дебита и др.) с целью идентификации источника возмущения и его временной и пространственной локализации, возникают неоднозначные решения. Это связано с недостатком информации о свойствах неоднородной геологической среды и ограниченностью наших представлений о механизмах трансформации гидрогеодинамических сигналов в таких условиях. Поэтому необходимо дальнейшее исследование тонких эффектов, возникающих при перераспределении пластового давления и фильтрации жидкости в условиях переменного поля напряжений и деформаций. Учёт таких эффектов может быть важен и применительно к решению задач определения упругих и фильтрационных параметров пластов.

Цель настоящей работы состоит в детальном изучении реакции пьезометрических скважин на возмущение пластового давления в условиях неоднородной геосреды и экспериментальном подтверждении наличия инверсионных гидрогеодинамических эффектов, имеющих теоретическое предсказание. Для достижения поставленной цели были проведены прецизионные наблюдения за динамикой уровней по кусту гидрогеологических скважин при откачке и последующем восстановлении уровней.

Откачка проводилась посредством погружного насоса из центральной скважины Р-ц, вскрывающей водоносный горизонт палеогеновых отложений в интервале 28-30 м. Во время эксперимента производились наблюдения за колебаниями уровня подземных вод в центральной и наблюдательных скважинах Р-1 и Р-2, оборудованных на этот же водоносный горизонт, а также по скважинам К-422, К-423 и К-424, оборудованных на залегающий ниже водоносный горизонт турон-маастрихтских отложений верхнего мела. Схема взаимного расположения скважин приведена на рис.1. Водоприёмная часть последних трёх скважин представляет собой открытый ствол в интервале 60-100 м. Палеогеновый водоносный горизонт сложен песками, а турон-маастрихтский – сильно трещиноватым мелом с прослоями мергеля. Указанные водоносные горизонты расположены в верхней части зоны активного водообмена, гидравлически связаны между собой и с грунтовыми водами. Превышение абсолютных отметок пьезометрической поверхности турон-маастрихтского горизонта над таковыми палеогенового горизонта указывает на восходящий характер фильтрации подземных вод на данном участке.

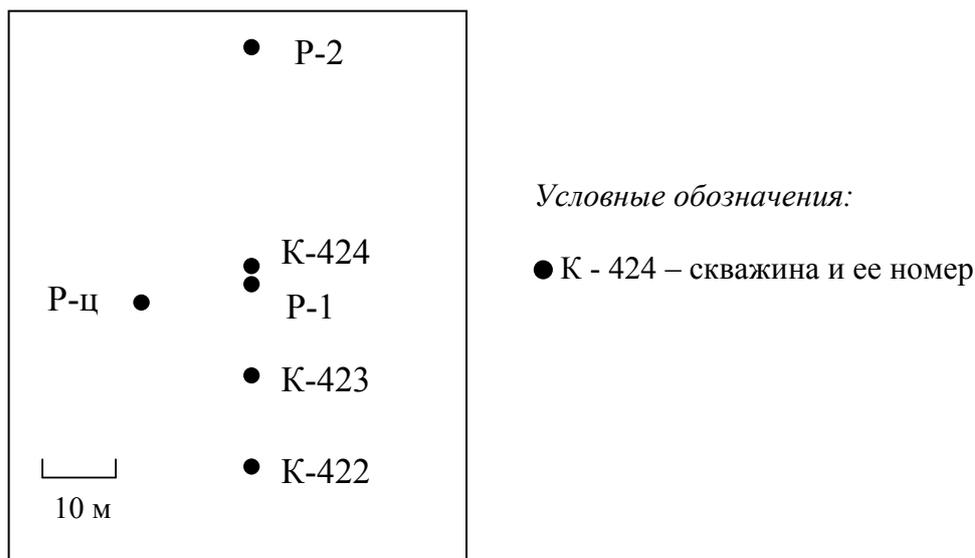


Рис.1. Схема расположения пьезометрических скважин

Проведению эксперимента предшествовали длительные режимные наблюдения по перечисленным скважинам. Длительность откачки составила 20 час. Регистрация колебаний уровня воды в скважине осуществлялась прецизионными датчиками ДД-6 манометрического типа, имеющими разрешение не хуже 0,5 мм водяного столба, с аналоговой записью на пишущий милливольтметр, а также автоматическими уровнемерами поплавкового типа с разрешением не хуже 1 мм. Измерения уровня воды в центральной скважине проводились посредством гидрогеологической рулетки с погрешностью в первые сантиметры.

Реакция уровня воды на откачку и восстановление была отмечена во всех наблюдательных скважинах (рис. 2). В центральной скважине Р-ц общее понижение составило приблизительно 2,4 м, а ответные понижения в наблюдательных скважинах Р-1 и Р-2 составили, соответственно, 0,50 и 0,20 м, а в скважинах К-424, К-423 и К-422 (в порядке удаления от центральной скважины), соответственно, 0,42 0,39 и 0,35 м. Реакция ближайшей к центральной скважине наблюдательной скважины Р-1 проявилась через 5 мин, а скважина Р-2 отреагировала спустя 40 мин после начала откачки. Реакция скважин, оборудованных на мергельно-меловую толщу, проявилась спустя 10–30 мин после начала откачки. Однако характер реакции уровня воды в этих скважинах в отличие от скважин Р-1 и Р-2 оказался неожиданным с позиций существующей практики опытно-фильтрационных исследований. Необходимо отметить, что ход уровня воды во всех пьезометрических скважинах еще задолго до начала и во время эксперимента испытывал спад трендового характера, вызванный спадом паводка на реке Сож. На фоне этого спада должно было бы происходить понижение уровня в наблюдательных скважинах, как реакция на падение пластового давления в палеогеновом горизонте, с той или иной задержкой, величина которой зависит от пьезопроводности водоносного горизонта. Однако в скважинах К-424, К-423 и К-422 (в этом порядке возрастает расстояние до центральной скважины) спустя, соответственно, 10, 15 и 30 мин после начала откачки уровень воды начал подниматься, несмотря на падение пластового давления в смежном палеогеновом водоносном горизонте. Амплитуда этих подъемов составила 4, 10 и 17 мм. Длительность эффектов составила, соответственно, 10, 15 и 60 мин. Затем началось понижение уровня, которое проходило в течение всего времени откачки из центральной скважины.

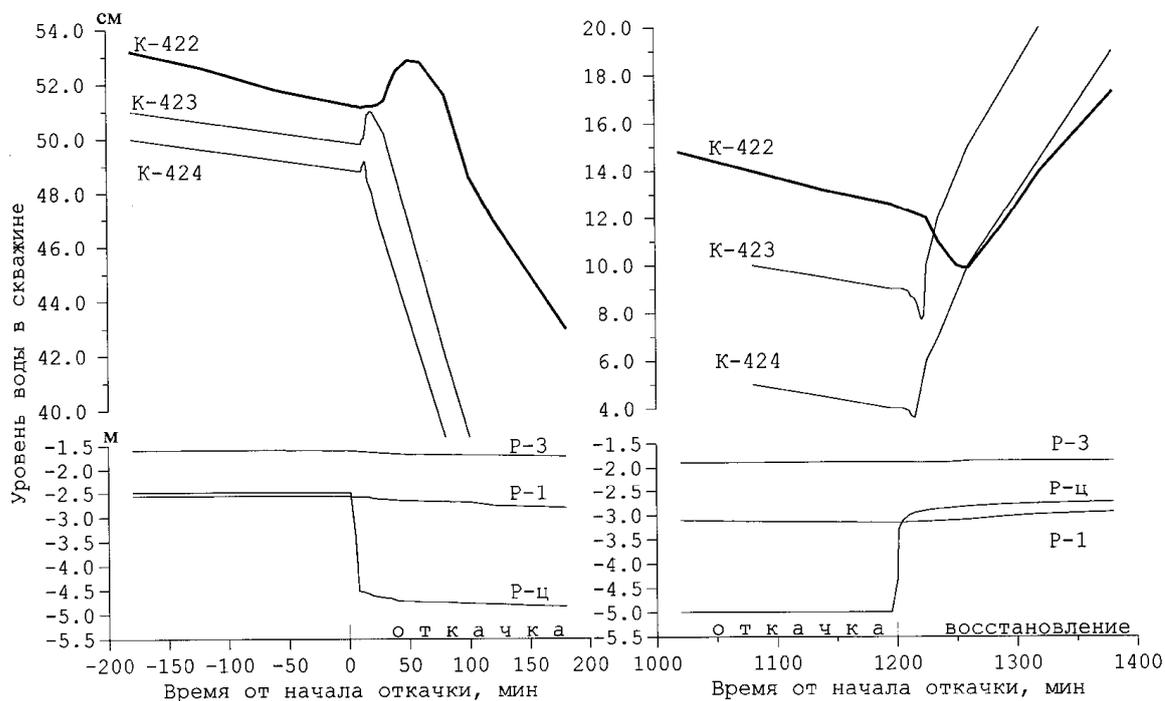


Рис. 2. Эффекты гидрогеодинамических инверсий уровня воды в пьезометрических скважинах

После выключения насоса в центральной скважине наблюдался обратный эффект в этих скважинах. Вместо подъема уровня, через 2-3 мин после выключения насоса в центральной скважине, в скважине К-424 на фоне продолжающегося спада уровня произошло еще более резкое, чем в заключительный период откачки, снижение уровня на 3-4 мм, длившееся приблизительно 10 мин, и только затем началось закономерное восстановление уровня. В более удаленных скважинах К-423 и К-422 инверсионный эффект проявился ещё более значительно, но с большей задержкой по времени: соответственно через 15 и 30 мин после выключения насоса амплитуда спадов уровня составила 9 и 16 мм. Длительность эффектов составила 12 и 60 мин, соответственно.

Отметим, что амплитуды и временные характеристики инверсионных эффектов, выявленных в начале откачки и после её прекращения очень близки между собой для данной скважины. При этом усматривается незначительное превышение амплитуд положительных эффектов над отрицательными. Если учесть, что положительным эффектам соответствует упругое сжатие коллектора, а отрицательным—его расширение, то такая асимметрия указывает на большую способность исследуемого трещиноватого пласта к деформациям сжатия, по сравнению с деформациями расширения. Такая особенность поведения пород при деформациях отмечена в [1], где указывается, что коэффициент сжимаемости пород существенно зависит от знака изменения напора: при сжатии (откачке) он больше, чем при разуплотнении (восстановлении уровня). Впрочем, для более убедительного подтверждения последнего эффекта в нашем случае необходимо повысить разрешающую способность уровнеметрической аппаратуры.

Следует отметить также, что по наблюдательным скважинам Р-1 и Р-2 эффекты инверсионных изменений давления в палеогеновом горизонте обнаружены не были.

При этом остаётся открытым вопрос о том, имели ли место эти эффекты вообще, либо они остались за пределами разрешающей способности использованной методики наблюдений.

Таким образом, в результате проведенного эксперимента в пьезометрических скважинах турон-маастрихтского водоносного горизонта выявлены обратные по знаку относительно исходного возмущения пластового давления эффекты колебаний уровня, амплитуда, задержка по времени и длительность которых возрастают по мере удаления от центральной скважины. Очевидно, что выявленные эффекты обусловлены сложным механизмом взаимодействия процессов деформации пород (деформационной волной) и фильтрацией в них жидкости в условиях неоднородной среды. Первоначально представлялся вероятным механизм разрядки за счёт резкого возмущения давления накопленных в трещиноватой среде естественных напряжений (триггерный эффект). Однако обычно триггерные эффекты проявляют мозаичную структуру поля напряжений в геологической среде, тогда как в нашем случае наблюдается закономерное изменение амплитуды «аномальных» изменений уровня по мере удаления от центральной скважины. Полное воспроизведение эффектов при последующих экспериментах (всего было проведено 4 эксперимента) по всем 3-м скважинам турон-маастрихтского горизонта указывает на иной механизм гидрогеодинамических аномалий. Поэтому представляется наиболее вероятным, что установленные эффекты являются результатом перераспределения объёмных упругих деформаций под действием первоначального импульса давления, скорости передачи которого существенно различны в скелете породы и заполняющей её пустоты жидкости: в скелете породы происходит квазимгновенная реакция на импульс давления, а в жидкости давление распределяется значительно медленнее.

Теоретическое подтверждение инверсионных эффектов найдено на основе численного моделирования при решении задачи о распределении давления в пористой упругой среде. Результаты этого моделирования анализируются в [2] с ссылкой на работы [3-5], в которых дано теоретическое предсказание инверсионных эффектов. Решение получено для двухслойной среды со следующими свойствами [2]: коэффициент проницаемости  $k = 3 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$ ; пьезопроводность  $D = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; мощность  $m=200 \text{ м}$  (верхний слой – глина) и  $k = 3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ ,  $D = 8,5 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $m=50 \text{ м}$  (нижний слой – песок).

На рис. 3 [2] представлен нормализованный отклик парового давления во времени на горизонтальном расстоянии 200 и 300 м от источника возмущения пластового давления, расположенного на глубине 230 м. График хорошо иллюстрирует наличие гидрогеодинамического инверсионного эффекта, его длительность и дальность проявления от области возмущения при указанных выше гидрогеологических параметрах. Согласно [2], рассматриваемый эффект имеет место только в неоднородной среде.

Сопоставление экспериментальных и модельных результатов показывает их соответствие в пределах порядка анализируемых величин – амплитуды и длительности инверсионного эффекта. Расхождения неизбежны ввиду недостаточной детальности графика на рис. 3 при расстояниях до источника возмущения менее 300 м и различий в величинах водопроводимости реальных и модельных условий. В данном случае важно качественное соответствие экспериментальных и модельных результатов, проявляющееся в росте амплитуды и длительности инверсионного эффекта с увеличением расстояния до источника возмущения пластового давления.

Выявленные экспериментально инверсионные и другие возможные тонкие эффекты, связанные с взаимодействием деформационных и фильтрационных процессов, заслуживают дальнейшего подробного изучения, поскольку при решении задач флюидодинамики необходимо знание механизмов трансформирования гидрогеодинамических сигналов, которые могут быть вызваны различными источниками: искусственно соз-

данными депрессиями и репрессиями, процессами в очаге будущего землетрясения, криповыми смещениями по разломам и т.д. В частности, интерес представляют эксперименты при значительных депрессиях на пласт в реологически ослабленных и тензочувствительных зонах, что может иметь место при испытании и эксплуатации глубоких нефтяных скважин. Вероятно, эти эффекты с теми или иными особенностями должны иметь широкое распространение в условиях резких возмущений пластового давления, а причина их “пропусков” в обычной практике опытно-фильтрационных работ кроется в низкой разрешающей способности применяемых методик гидродинамических исследований.

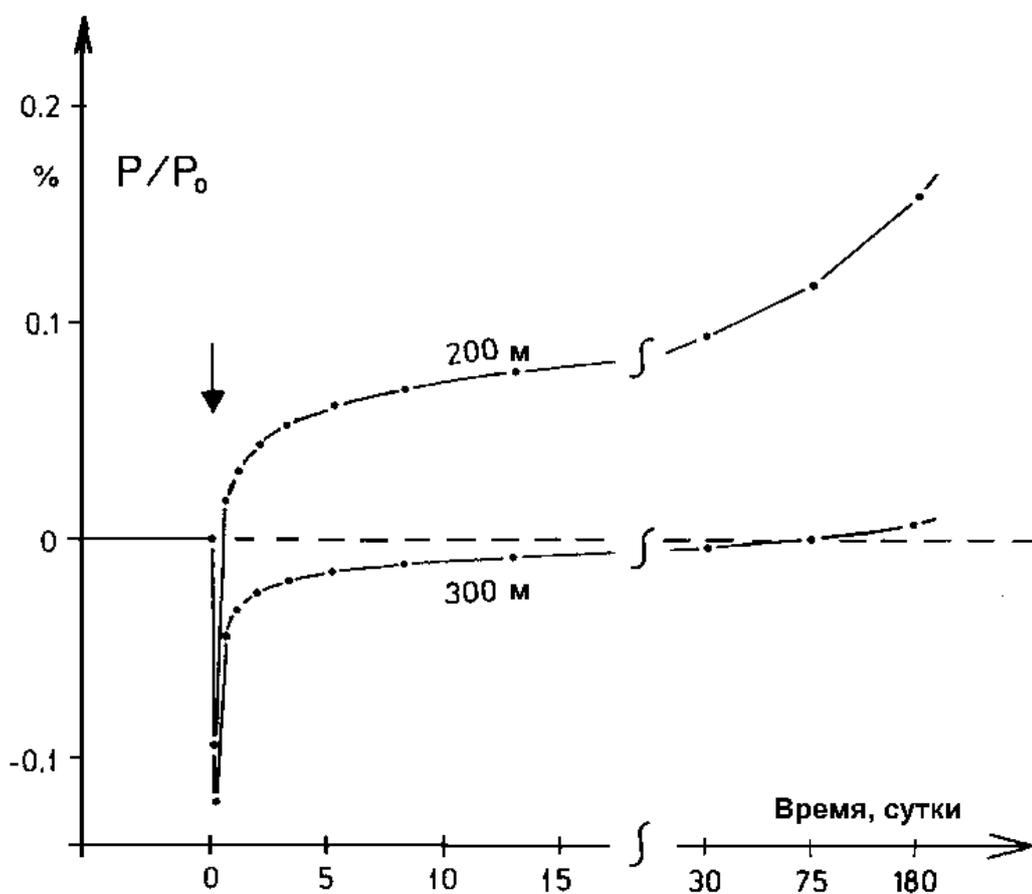


Рис. 3. Нормализованный отклик пластового давления во времени на горизонтальном расстоянии 200 и 300 м от источника возмущения и на глубине 230 м для двуслойной среды.  $P_0$  — повышение пластового давления в источнике возмущения [3]. Стрелка отмечает начальное время для  $P_0 \neq 0$ . Результаты вычислений изображены точками, пунктиры — линейные интерполяции

В заключение автор выражает благодарность К.Г. Паскару за помощь, оказанную им при проведении гидрогеодинамических наблюдений.

### Литература

1. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики.- М.: Недра, 1974.
2. Kumpel H.-J. About the potential of wells to reflect stress variations within inhomogeneous crust. Tectonophysics, 1992. V. 211. P.317-336.

3. Lege T. Finite Elemente Modellierung der Ausbreitung von Porendruckstrungen in sensiti-  
tiven Zonen. Diploma thesis. Institute of Geophysics, 1990. University of Kiel.
4. Mandel J. Consolidation des Sols. Geotechnique. 1953. №3. P. 287-299.
5. Cryer C.W. A comparison of the three-dimensional consolidation theories of Biot and Ter-  
zaghi. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. 1963. №16. P. 401-412.