УДК 551.49:550.344.4

А.А.ЛУКИН
Томский государственный политехнический университет

ВОЛНОВОЙ ПРИНЦИП ОБОСНОВАНИЯ ГРАНИЦ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

При численном определении волновых характеристик в напорном поле для обоснования границ гидродинамического влияния геотехнических систем (ГТС) были поставлены две проблемы: изучение волновых процессов и явлений в водонапорных системах и обоснование новых физических критериев и методов оценки границ гидродинамического влияния на недра большого класса геотехнических систем (водозаборов подземных вод, полигонов подземного захоронения отходов, нефтегазовых промыслов и др.). В связи с этим были решены задачи компьютерного моделирования гармонического низкочастотного возбуждения напорного гидродинамического поля от одиночной скважины (постановка и решение задачи в варианте планирования эксперимента) и моделирования природного напорного поля в реальных условиях неравномерно прерывистого промышленного режима закачки жидких отходов.

The main goal of the investigation was to numerically determine and apply wave characteristics in a pressure-tight field in justification of the hydrodynamic influence limits in geotechnical systems. However, that research dealt with two problems: studies of wave processes and phenomena in water-pressure systems and justification of new material criteria and assessment techniques to estimate limits of hydrodynamic influence on interiors of a large variety of geotechnical systems (i.e. underground water intake structures, subsurface waste disposals, oil-and-gas fields, etc.). The following two tasks of the investigation were solved: computer simulation of harmonic low-frequency excitation of a pressure-tight hydrodynamic field from a single well (formulation and solution of the problem as experiment planning); modelling of a natural pressure-tight field in real conditions of non-uniform discontinuous industrial mode of pumping liquid wastes from a chemical plant.

Цель исследования – численное определение волновых характеристик в напорном поле и их использование при обосновании границ гидродинамического влияния геотехнических систем (ГТС). Исследование затрагивает две проблемы: изучение волновых процессов и явлений в водонапорных системах [1, 2, 4] и обоснование новых физических критериев и методов оценки границ гидродинамического влияния на недра большого класса ГТС (водозаборов подземных вод, полигонов подземного захоронения отходов, нефтегазовых промыслов и др.). Решены две задачи:

1) компьютерное моделирование гармонического низкочастотного возбуждения напорного гидродинамического поля от одиночной скважины (постановка и решение задачи в варианте планирования эксперимента);

2) моделирование природного напорного поля в реальных условиях неравномерно прерывистого промышленного режима закачки жидких отходов химического комбината.

В первой задаче моделировалась напорная гидродинамическая система, гармонически возбуждаемая совершенной скважиной в режиме откачки-закачки. В планируемом эксперименте исходные гидрогеологические условия являются неизменными. Переменными условиями эксперимента приняты период и амплитуда гармонического возбуждения напорного поля. В программе HydroGeo нельзя задать колебание расхода в скважине по гармонической функции. Поэтому условие поставленной задачи методически было выполнено равномерно ступенчатым изменением

расхода. В эксперименте запланированы три продолжительности периодов: 1, 24 и 360 суток. В качестве аргументов независимо были заданы три значения амплитуд в гармоническом колебании расхода скважины. По условию эксперимента эти значения различались на математический порядок: 9.6, 96, и 960 м^3/сут. По сочетанию трех заданных периодов и амплитуд в планируемом эксперименте получается девять частных задач моделирования, условия которых были заданы в матричной форме.

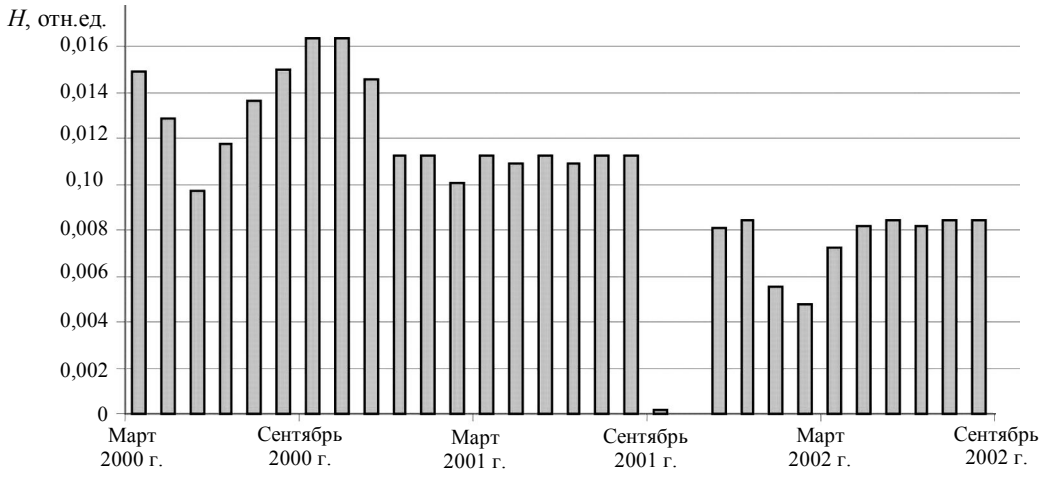


Рис.1. Объемы *H* закачки отходов во II горизонт через нагнетательную скважину Н-16

Во второй задаче моделировалось напорное поле двух технологических водоносных горизонтов в условиях промышленного режима закачки жидких отходов химического комбината. Использованы данные закачки отходов, произведенной комбинатом в 2000-2002 гг. В качестве примера приведен график закачки в одну из типовых нагнетательных скважин Н-16, характеризующий динамику изменения средних месячных объемов закачки в относительных единицах (рис.1). Подобные графики имеются по всем нагнетательным скважинам и полигону в целом. В настоящее время промышленная закачка проводится в неравномерно прерывистом режиме. Моделируемый гидрогеологический разрез II и III технологических горизонтов (приемников жидких отходов) приведен в работе [5]. Моделирование выполнено раздельно в режиме закачки каждой нагнетательной скважины и в технологическом режиме групповой закачки во II и III горизонты отдельно.

Результаты моделирования обеих задач представлены функциональными графическими зависимостями. Конечными, «целевыми» являются графические зависимости $A = f(r)$, где r – радиус влияния, по которым определяется граница гидродинамического влияния как отдельных скважин, так и объединенных в ГТС. На рис.2, *а* вынесены кривые амплитудного затухания «бегущих волн» для частных задач 1-3, сгруппированных по последней строке матрицы условий. Для этих задач расходные характеристики откачки-закачки одинаковы $Q = 960$ м^3/сут, $\Delta Q = 240$ м^3/сут. Периоды T и длительности временных фаз Δt возбуждения различны, сутки: $T_1 = 1$, $\Delta t_1 = 0{,}125$; $T_2 = 24$, $\Delta t_2 = 3$; $T_3 = 360$, $\Delta t_3 = 45$. На рис.2, *б* приведены две кривые $A = f(r)$, полученные при моделировании промышленной закачки отходов в нагнетательную скважину Н-16.

Для построения графиков использованы значения $\Delta H = H_{\max} - H_{\min}$ на первой и второй полуволнах промышленной закачки, которые проявляются на графиках $H = f(t)$. Графики (рис.2, *а*) демонстрируют важное явление – «срезание частот», известное в физике волн [3]. Оно выражается в том, что при одинаковой амплитуде возбуждения с некоторого значения частоты амплитудные характеристики затухания «бегущих» волн становятся близкими, независимыми от частоты возбуждения (кривые 2 и 3).

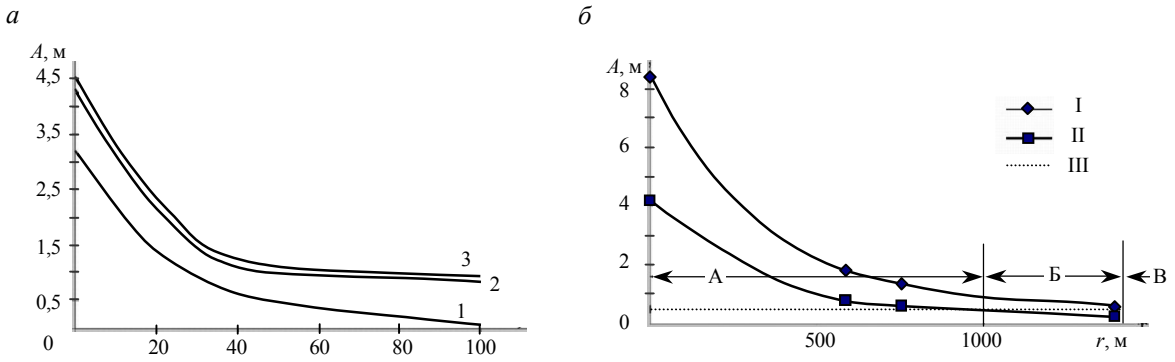


Рис.2. Графики $A = f(r)$

1-3 – для условий частных экспериментальных задач; I и II – кривые волнового затухания при максимальной и минимальной закачке соответственно; III – уровень природных колебаний ΔH; А, Б и В – зоны мониторинга, ближняя, средняя и дальняя соответственно

Определение границ можно выполнить графическим и расчетным способами. При графическом способе необходимо задаться предельной амплитудой, ниже которой влияние источника принимается несущественным. Через ординату предельной амплитуды проводится прямая, параллельная оси r. Точка пересечения прямой с кривой $A = f(r)$ является концом радиуса влияния (рис.2, *б*). Здесь для II технологического горизонта за предельную амплитуду принята величина 0,5 м, которая соответствует среднегодовым колебаниям уровня подземных вод горизонта в естественных условиях режима. На рис.2, *б* также показан графический способ выделения функциональных зон гидродинамического мониторинга ГТС. Чтобы использовать расчетный способ границ гидродинамического влияния, дополнительно нужно знать одну волновую характеристику – длину «бегущей» волны λ. Она находится моделированием. Далее расчеты сводятся к определению декремента затухания ϑ [6], числа волн n, где амплитуда достигает заданного предела A_n, и соответствующего радиуса влияния r:

$$\vartheta = \ln\frac{A_i}{A_{i+1}}, \quad n = \ln\frac{A_o}{A_n}/\vartheta, \quad r = n\lambda,$$

где A_i и A_{i+1} – значения двух последовательных амплитуд (или одинаковых фаз) каждой последующей волны ($i = 0, 1, 2, \ldots, n$); A_0 – амплитуда в источнике возбуждения.

Для примера приведены результаты расчетов границ амплитудного затухания возбуждаемых бегущих волн в напорном поле для условий одной из частных задач (кривая затухания 3 на рис.2, *а*).

Моделирование девяти частных задач, входящих в плановый эксперимент, и расчеты показали, что длина λ «бегущей» волны оказалась равной 80 м для всех исходных частот и амплитуд возбуждения. Значения амплитуд в скважине и на расстоянии $\lambda = 80$ м равны 4,54 и 1 м. Декремент затухания $\vartheta = 1{,}51$. Условно зададимся тремя пределами граничных амплитуд A_n, равными 0,5; 0,05 и 0,005 м. Расчетом получаем граничные радиусы их проявления: 117; 239 и 361 м соответственно. Это значит, что при амплитуде возбуждения 4,54 м с периодом один год в заданной гидродинамической системе амплитуда уменьшается до 5 мм уже на расстоянии 361 м от источника возбуждения напорного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бузинов С.Н.* Гидродинамические методы исследования скважин и пластов / С.Н.Бузинов, И.Д.Умрихин. М.: Недра, 1973. 248 с.

2. Исследование водоносных горизонтов методом колебаний / В.И.Башмаков, Л.В.Боревский Г.С.Вартанян и др. // Водные ресурсы. 1986. Т.13. С.234-239.

3. *Крауфорд К.* Волны. Берклиевский курс физики / Пер. с англ.; Под ред. А.И.Шальникова и А.О.Вайсенберга. М.: Наука, 1976. Т.3. 528 с.

4. Определение гидрогеологических параметров водопроводящих коллекторов методом импульсного воздействия на пласт / Е.П.Вольницкая, Э.М.Вольницкая, М.В.Лурье, В.П.Прилепский // Изв. вузов. Геология и разведка. 1999. № 5. С.83-88.

5. Техногенные геохимические процессы в песчаных пластах-коллекторах при захоронении жидких радиоактивных отходов / А.А.Зубков, О.В.Макарова В.В.Данилов и др. // Геоэкология. 2002. № 2. С.133–144.

6. *Форхгеймер Ф.* Гидравлика. М.-Л.: ОНТИ, 1935. 616 с.

Научные руководители: доценты *Е.В.Гусев, А.А.Лукин*