

УДК 628.112

## О МЕТОДЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ УРЕГУЛИРОВАННОГО ВОДОЗАБОРА ИЗ ВЫСОКОНАПОРНОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА

Н.Л. Меликян, Н.Г. Алоян

*Институт водных проблем и гидротехники им. акад. И.В. Егизарова*

На основе результатов ранее проведенных модельных исследований по внезапному уменьшению дебита фонтанирующих скважин и с учетом формул гидрогеологического расчета этих скважин дается аналитическая связь для определения значения введенного здесь краном местного гидравлического сопротивления, посредством которого обеспечивается целевое значение дебита этой скважины. Полученное значение действительно как при внезапном уменьшении, так и при внезапном увеличении дебитов. Предлагаемая связь дает возможность произвести автоматическое поэтапное управление, определяя заранее поэтапно меняющиеся значения введенных местных гидравлических сопротивлений. Модельными исследованиями оценена также пригодность формулы Тейса по определению значения частичного восстановления напора, являющегося следствием внезапного уменьшения дебитов скважин. При этом принято, что в данной точке виртуально действует инъекционная скважина с постоянным дебитом, равным уменьшенному. Полученное расхождение (около 19%) показывает, что исследования в этом направлении необходимо углублять.

**Ключевые слова:** напорный водоносный горизонт, фонтанирующая скважина, внезапное уменьшение дебита, местное гидравлическое сопротивление, инъекция, восстановление напора.

**Введение.** Артезианский водный бассейн Араратской равнины крайне истощен и находится в тяжелом экологическом состоянии. Это, главным образом, следствие того, что имеющие большое распространение в регионе рыбные водохозяйственные пруды получают свое питание из фонтанирующих скважин, заложенных в напорном водоносном горизонте данного бассейна. Эти скважины построены хаотичным образом, без соответствующих гидрогеологических проектных расчетов и без учета взаимовлияния между ними и другими водоисточниками. Дебит этих скважин обычно превышает официально допустимое значение и часто бывает выше нормы, необходимой для рыбного производства в данном пруде.

Становится очевидным, что без проведения должных мероприятий для спасения напорного водоносного горизонта скоро будет осуждено на гибель и рыбное хозяйство, тесно связанное с состоянием артезианского бассейна. В правительстве РА уже предприняты первые шаги. С помощью кранов уменьшают дебиты фонтанирующих скважин до официально допустимых

значений, ликвидируются бесхозные скважины и т.д. Результаты этих мероприятий уже ощутимы, требуется их продолжение.

**Постановка задачи и обоснование метода.** Для внезапного уменьшения дебита фонтанирующих скважин и приближения его к допустимому значению необходимо с помощью крана ввести дополнительное гидравлическое сопротивление. Для достижения этой цели вместо постепенно приближенного метода, являющегося трудоемким и недостаточно точным, необходимо разработать метод, который дает возможность заранее, в зависимости от целевого значения дебита, определить то значение местного гидравлического сопротивления, при вводе которого в скважине будет обеспечено формирование требуемого дебита.

Поставленная задача не имеет своего теоретического решения из-за нелинейности и разрыва краевого условия на забое скважины, а примененный для этой цели метод математического моделирования – весьма трудоемкий и затянутый [1,2]. Используя расчетную формулу Н.Л. Меликяна, дается решение задачи для определения дебита фонтанирующей скважины [2]. Для осуществления целевого преобразования этой формулы использованы цифровые данные по исследованию выполненной ранее нами на гидроинтеграторе поставленной задачи [3].

**Результаты исследования.** В работе [2] для получения формулы по определению дебита одиночной фонтанирующей скважины дается следующая промежуточная зависимость:

$$Q = \frac{4\pi km H_o}{F_o + 4\pi km \eta Q}. \quad (1)$$

Здесь Q - дебит скважины в любой момент времени t; k - коэффициент фильтрации водоносного пласта; m - его мощность; H<sub>o</sub> - начальный положительный напор в пласте; η - общее внутреннее гидравлическое сопротивление скважины; F<sub>o</sub> - параметр Фюрье, вид которого следующий:

$$F_o = \ln \frac{2,25at}{r_o^2} + 2\xi_{нс}, \quad (2)$$

где r<sub>o</sub> - радиус скважины; ξ<sub>нс</sub> - коэффициент несовершенства скважины;  $a = \frac{km}{\mu^*}$  - пьезопроводимость пласта; μ\* - коэффициент упругой водоотдачи.

Решая уравнение (1), дается следующая расчетная формула для определения дебита скважины [2]:

$$Q = \frac{\sqrt{F_o^2 + 64\pi^2 (km)^2 H_o \eta} - F_o}{8\pi km \eta}. \quad (3)$$

Гидравлические сопротивления скважины, учитывающие также значения введенных там местных дополнительных сопротивлений, определяются по зависимости [2,3]

$$\eta = \frac{1 + \lambda \frac{\ell}{2r_o} + \xi_k}{2g\pi^2 r_o^4}, \quad (4)$$

где  $\ell$  - глубина скважины;  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения;  $\xi_k$  - коэффициент местного гидравлического сопротивления;  $g$  - коэффициент ускорения свободного падения в размерности  $сут/м^2$ .

Обозначая  $\eta_o = \frac{1 + \lambda \frac{\ell}{2r_o}}{2g\pi^2 r_o^4}$ , уравнение (4) примет следующий вид:

$$\eta = \eta_o + \frac{\xi_k}{2g\pi^2 r_o^4}, \quad (5)$$

где  $\eta_o$  - начальное, ненарушенное гидравлическое сопротивление скважины.

Из уравнения (1) для  $\eta$  можем написать

$$\eta = \frac{H}{Q^2} - \frac{F_o}{4\pi kmQ}. \quad (6)$$

Приравнявая уравнения (5) и (6), для  $\xi_k$  получим следующую расчетную формулу:

$$\xi_k = 2g\pi^2 r_o^4 \left( \frac{H_o}{Q^2} - \frac{F_o}{4\pi kmQ} - \eta_o \right). \quad (7)$$

Используя приведенные в работе [3] результаты модельных исследований резкого уменьшения дебита фонтанирующих скважин, проверим степень пригодности формулы (6) для определения значения  $\xi_k$ .

В отмеченных модельных исследованиях для задач приняты следующие исходные параметры: проводимость пласта  $T = km = 3000 \text{ м}^2 / \text{сут}$ ,  $a = 3 \cdot 10^5 \text{ м}^2 / \text{сут}$ ,  $H_o = 13,5 \text{ м}$ ,  $\eta_o = 7,59 \cdot 10^{-9} \text{ сут}^2 / \text{м}^5$ ,  $r_o = 0,105 \text{ м}$ .

Здесь рассмотрены три этапа резкого уменьшения дебита скважины. Без дополнительных сопротивлений скважина работала 50 суток, за это время дебит составил  $19200 \text{ м}^3 / \text{сут}$  (по формуле (2) получено  $18800 \text{ м}^3 / \text{сут}$ ). После этого возникла необходимость резко уменьшить дебит до значения  $15200 \text{ м}^3 / \text{сут}$ . Определив необходимое значение  $\xi_k$  по формуле (6), будем иметь

$$F_o = \ell n \frac{2,25 \cdot 10^5 \cdot 50}{0,105^2} = 21,84$$

и

$$\xi_{k_1} = 2 \cdot 9,81 \cdot 86400^2 \cdot 3,14^2 \cdot 0,105^4 \times \left( \frac{13,5}{15200^2} - \frac{21,85}{4 \cdot 3,14 \cdot 3000 \cdot 15200} - 7,59 \cdot 10^{-9} \right) = 2,25.$$

В модельных исследованиях было принято  $\xi_{k_1} = 2,24$ .

Проверим истинность полученного значения  $\xi_{k_1}$ . Определив по (5) новое значение  $\eta$ , получим уравнение

$$\eta_1 = 7,59 \cdot 10^{-9} + \frac{2,25}{2 \cdot 9,81 \cdot 86400^2 \cdot 3,14^2 \cdot 0,105^4} = 2,041 \cdot 10^{-8} \text{ сут}^2 / \text{м}^5,$$

которому по формуле (2) соответствует

$$Q = \frac{\sqrt{21,84^2 + 64 \cdot 3,14^2 \cdot 3000^2 \cdot 13,5 \cdot 2,041 \cdot 10^{-8}} - 21,84}{8 \cdot 3,14 \cdot 3000 \cdot 2,041 \cdot 10^{-8}} = 15180 \text{ м}^3 / \text{сут}.$$

В модельных исследованиях получено  $Q = 15170 \text{ м}^3 / \text{сут}$ .

Фонтанирующая скважина с сопротивлением  $\eta_1$  действовала еще 50 сут., после чего на втором этапе необходимо ее дебит уменьшить до  $11100 \text{ м}^3 / \text{сут}$ .

Определив по формуле (7)  $\xi_{k_2}$ , будем иметь

$$\xi_{k_2} = 2 \cdot 9,81 \cdot 86400^2 \cdot 3,14^2 \cdot 0,105^4 \times \left( \frac{13,5}{11100^2} - \frac{22,533}{4 \cdot 3,14 \cdot 3000 \cdot 11100} - 7,59 \cdot 10^{-9} \right) = 8,46,$$

которому соответствует

$$\eta_2 = 7,59 \cdot 10^{-9} + \frac{8,46}{2 \cdot 9,81 \cdot 86400^2 \cdot 3,14^2 \cdot 0,105^4} = 5,58 \cdot 10^{-8} \text{ сут}^2 / \text{м}^5.$$

Для этого случая по формуле (2) получено:  $Q = 11093 \text{ м}^3 / \text{сут}$ , т.е.  $\xi_{k_2}$  обеспечило получение целевого дебита. Длительность второго этапа состоит из 50 суток.

В модельных исследованиях [3] на третьем этапе дебит уменьшен до значения  $8200 \text{ м}^3 / \text{сут}$ , для которого по формуле (7) получим  $\xi_{k_2} = 20,16$  (против ранее полученного модельного значения 19,96), а  $\eta_2 = 12,25 \cdot 10^{-8} \text{ сут}^2 / \text{м}^5$ . По формуле (2) дебит скважины будет  $Q = 8302 \text{ м}^3 / \text{сут}$ .

Результаты расчетов резких уменьшений дебитов фонтанирующих скважин в обобщенной форме представлены в таблице (здесь представлены также цифры, расчет которых в текстовой части не приводится).

Таблица

Значения местных гидравлических сопротивлений на различных этапах внезапного уменьшения дебитов

| Этапы | Продолжительность работы скважины, $t, сут$ | Дебиты скважин, $м^3/сут$ |           |                | Коэффициент мест. гидравл. сопротивл. |                | Общее гидравлическое сопротивление, $сут^2/м^5$ |                       |
|-------|---|---------------------------|-----------|----------------|---------------------------------------|----------------|---|-----------------------|
|       |   | целевое значение          | по модели | по формуле (2) | по модели                             | по формуле (7) | по модели                                       | по формуле (5)        |
| 0     | 5   | -                         | 21390     | 20200          | 0                                     | 0              | $7,59 \cdot 10^{-9}$                            | $7,59 \cdot 10^{-9}$  |
|       | 50  | -                         | 19200     | 18800          | 0                                     | 0              | $7,59 \cdot 10^{-9}$                            | $7,59 \cdot 10^{-9}$  |
| I     | 50+*  | 15200                     | 15570     | 15180          | 2,24                                  | 2,25           | $2,03 \cdot 10^{-8}$                            | $2,04 \cdot 10^{-8}$  |
| II    | 100+*                                       | 11100                     | 11010     | 11093          | 7,32                                  | 8,46           | $4,93 \cdot 10^{-8}$                            | $5,58 \cdot 10^{-8}$  |
| III   | 150+*                                       | 8200                      | 8134      | 8302           | 19,96                                 | 21,16          | $1,289 \cdot 10^{-7}$                           | $1,227 \cdot 10^{-7}$ |

(\*) – непосредственно после отмеченного времени

Сопоставление модельных и расчетных данных позволяет утверждать, что формула (7) по определению коэффициента местного гидравлического сопротивления, введенного в скважину для внезапного уменьшения дебита до его целевого значения, вполне приемлема с достаточной точностью.

Техника и метод ввода в скважину дополнительного гидравлического сопротивления с помощью кранов в достаточной мере освещены в специальной литературе [4], и поэтому нет необходимости описывать их здесь.

Рассмотрим также процесс частичного восстановления пьезометрического напора в водоносном пласте, приводящего к резкому уменьшению дебита скважины.

В какой-то момент времени, когда резко уменьшается дебит скважины, это можно рассмотреть так, что скважина продолжает действовать с ненарушенным дебитом, и одновременно в этот же момент в той же точке начинает действовать виртуальная инъекционная скважина с постоянным дебитом в размере, равном уменьшенной части.

В теории динамики подземных вод принято, что при инъекции воды в пласт с постоянным дебитом гидрогеологические расчеты производятся тем же методом, что и при водозаборе, только здесь, поменяв знак дебета, вместо падения пьезометрического напора определяется его повышение [1,5].

В отмеченных модельных исследованиях наряду с изучением процессов уменьшения дебитов в какой-то мере рассмотрено и явление повышения напора в отдельных точках водоносного пласта.

В частности, когда на первом этапе дебит фонтанирующей скважины снижается с  $19200 м^3/сут$  на  $15420 м^3/сут$  ( $\Delta Q = 19200 - 15420 = 3780 м^3/сут$ ), тогда на расстоянии  $r = 250 м$  от скважины через  $t = 50 сут$  частичное восстановление напора составит  $\Delta h = 0,52 м$ . По этим данным выясним пригодность формулы Тейса [1,5] и ее точность.

Имея в виду вышеизложенное, при  $\frac{r^2}{4at} < 0,1$  формула Тейса принимает вид

$$\Delta h = \frac{\Delta Q}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r^2}, \quad (8)$$

где  $\Delta h$  - восстановление напора;  $\Delta Q$  - дебит инъекционной скважины.

Подставляя соответствующие модельные данные в формулу (8), получим

$$\Delta h = \frac{3780}{4 \cdot 3,14 \cdot 3000} \ln \frac{2,25 \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 50}{250^2} = 0,62 \text{ м.}$$

Видно, что отклонение составляет 19%, что в гидрогеологических расчетах можно принять допустимым. В этом направлении намечается проводить более детальные и глубокие исследования.

### **Выводы**

1. Получена формула (7), с помощью которой можно с достаточной точностью определить значения коэффициента местного гидравлического сопротивления, введенного в фонтанирующую скважину с целью внезапного уменьшения ее дебита.
2. Полученная формула (7) дает возможность составить программу автоматического регулирования дебита скважины при переменном количестве требуемой воды.
3. Вследствие внезапного уменьшения дебита фонтанирующей скважины в напорном водоносном пласте происходит частичное восстановление напора. Величину этого роста с некоторой приближенностью можно определить по формуле Тейса, принимая, что в этой точке еще действует виртуальная инъекционная скважина с постоянным дебитом в размере, равном уменьшенному.

*Работа проводится в рамках темы “Разработка метода управления фонтанирующими скважинами и регулирования дебитов с учетом внутрискважинной гидравлики” (13-1E224), финансируемой по линии научной и научно-технической деятельности государственным бюджетом РА.*

### **Литература**

1. **Kruseman G.P., Ridder N.A.** Analysis and evaluation of pumping test data. Second edition (completely revised). - Netherland, 1994.- 377 p.
2. **Մելիքյան Ն.Լ.** Արտեզյան ավազանի ջրերի շահագործական պաշարների արդյունավետ օգտագործման և կառավարման մեթոդները: Դոկտորական ատենախոսություն. - Երևան, 2006. - 350 էջ:
3. **Меликян Н.Л., Алоян Н.Г., Саакян Г.С.** О внезапном уменьшении дебита фонтанирующей скважины // Вестник НПУА. Гидрология и гидротехника. - 2015.- N2.- С. 44-53.
4. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М., 1960.- 677 с.
5. **Бочевер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М.** Основы гидрогеологических расчетов. - М.: Недра, 1969. - 367 с.

*Поступила в редакцию 08.04.2015.  
Принята к опубликованию 22.02.2016.*

**ԲԱՐՁՐ ՃՆՇՈՒՄԱՅԻՆ ԶՐԱՏԱՐ ՇԵՐՏԻՑ ԿԱՌԱՎԱՐԵԼԻ ԶՐԱՌՄԱՆ  
ԶՐԱԵՐԿՐԱԲԱՆԱԿԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ ԵՂԱՆԱԿԻ ՄԱՍԻՆ**

**Ն.Լ. Մելիքյան, Ն.Գ. Ալոյան**

Օգտագործելով շատրվանող հորատանցքերի կտրուկ նվազեցման գործընթացի նախկինում կատարված մոդելային ուսումնասիրությունների արդյունքները և այդ նույն հորատանցքերի ջրաերկրաբանական հաշվարկների բանաձևերը՝ տրվում է անալիտիկ կապ՝ որոշելու հորատանցք ներմուծվող տեղական հիդրավլիկական դիմադրության արժեքը, որի դեպքում կապահովվի ելքի թիրախային մեծությունը: Այն կիրառելի է ինչպես ելքերի կտրուկ նվազեցման, այնպես էլ կտրուկ վերականգնման գործառույթներում: Առաջարկվող բանաձևը հնարավորություն է տալիս իրականացնել հորատանցքի ելքերի ավտոմատ փուլային կառավարում՝ կանխավ որոշելով հերթափոխվող ներմուծվող տեղական հիդրավլիկական դիմադրության արժեքը: Հիշյալ մոդելային ուսումնասիրության արդյունքներով գնահատվել է նաև Թեյսի հանրահայտ բանաձևի կիրառման պիտանիությունը՝ ելքերի կտրուկ նվազեցման հետևանքով ջրատար շերտում պիեզոմետրիկ ճնշման մասնակի վերականգնումը հաշվարկելու համար: Ընդունվել է, որ տվյալ կետում գործում է երևակայական ներարկվող հորատանցք հաստատուն ելքով, որը հավասար է իրականի նվազեցված չափին: Ստացած շեղումը (շուրջ 19%) ցույց է տալիս, որ այդ ուղղությամբ ուսումնասիրություններն անհրաժեշտ է խորացնել:

**Առանցքային բառեր.** ճնշումային ջրատար հորիզոն, շատրվանող հորատանցք, ելքերի կտրուկ նվազում, տեղական հիդրավլիկական դիմադրություն, ներարկում, ճնշման վերականգնում:

**METHODS OF HYDROGEOLOGICAL CALCULATIONS OF THE  
REGULATED WATER INTAKE FROM HIGH-PRESSURE WATER-BEARING  
HORIZON**

**N.L. Melikyan, N.G. Aloyan**

Based on the results of earlier modeling studies on a sudden decrease in the flow rate of the same flowing wells and taking into account the formulae for hydrogeological calculation of these wells, the analytical relationship to determine the values of the introduced gate valve of local hydraulic resistance, providing the target value of the flow rate of that well is given. The obtained value is true at both a sudden decrease and a sudden increase in discharge. The proposed relationship gives an opportunity to make an automatic phased control by determining the phased changing values of the entered local hydraulic resistances. By model studies, the suitability of Theis formula to determine the value of the partial restoration of pressure as a consequence of the sudden decrease in the flow rates is also estimated. It is also accepted that at this point, the injection well acts virtually with a constant flow rate equal to the reduced one. The resulting discrepancy (about 19%) shows that in this direction research is to be deepened.

**Keywords:** pressure aquifer, flowing well, a sudden decrease in flow rate, the local hydraulic resistance, injection, pressure recovery.