

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 628.112

**К РАСЧЕТУ МЕЖРЕМОНТНЫХ ПЕРИОДОВ РАБОТЫ
СКВАЖИННЫХ ВОДОЗАБОРОВ С УЧЕТОМ СТАРЕНИЯ СКВАЖИН***Канд. техн. наук, доц. ИВАШЕЧКИН В. В., асп. ШЕЙКО А. М.**Белорусский национальный технический университет*

Опыт эксплуатации водозаборов подземных вод показывает, что со временем вследствие явлений кольматажа происходит увеличение сопротивления фильтров и прифилтровых зон скважин, а это приводит к понижению уровня S воды в стволе при работе насоса. Для каждой скважины существует допустимое значение $S_{\text{доп}}$, которое зависит как от ее конструкции, так и от рентабельности эксплуатации. Поэтому при искусственном поддержании понижения в скважине на уровне $S = S_{\text{доп}}$ в условиях кольматации фильтра неизбежно снижается дебит скважины Q . Также суммарная производительность скважинного водозабора ΣQ_j будет уменьшаться и может стать ниже нормы водопотребления Q_s населенного пункта или предприятия.

В [1] для определения периода стабильной работы водозабора T_p , при котором $\Sigma Q_j = Q_s$, составлена и решена система алгебраических уравнений, в которых по каждой скважине задавалось условие: $S_j = S_{j\text{доп}}$ и определялись дебиты скважин Q_j . Значения допустимых понижений $S_{j\text{доп}}$ определялись исходя из конструкций скважин, а выражения для S_j представляли собой формулы расчета понижения в скважинах с учетом переменных во времени коэффициентов сопротивления $\zeta(t)$ фильтров и взаимодействия скважин водозабора.

Для решения такой системы уравнений необходимо точное знание параметров пластов, прифилтровых зон, величин коэффициентов сопротивления $\zeta(t)$ фильтров и их изменения во времени. Кроме того, работу скважин в режиме $S_j = \text{const}$ на практике трудно обеспечить, так как из-за кольматации фильтров происходит

снижение не только дебита скважин, но и срезы уровней. Выбрать насосное оборудование для всех скважин водозабора, в точности обеспечивающее заданное значение S_j , не представляется возможным, так как количество типовых размеров серийно выпускаемых насосов ограничено и на скважинах устанавливаются близкие по параметрам насосные агрегаты.

Поэтому при расчете межремонтного периода действующего водозабора необходим комплексный анализ системы подачи воды в целом, в которую помимо скважин входят погружные насосы с водоподъемными трубами и линиями подключения их к сборному водоводу, сам сборный водовод и сборные резервуары. Для этого нужно определить фактические режимы работы основных элементов водозабора для различных периодов времени с учетом сложившейся интенсивности кольматационных процессов на скважинах.

Интенсивность кольматационных процессов на скважине можно проследить по изменению удельного дебита q во времени. В начальный период работы скважины уменьшение $q(t)$ происходит относительно медленно. Однако с ростом насыщенности пористой среды кольмантом через определенный для каждой скважины промежуток времени изменение $q(t)$ существенно интенсифицируется. На кривой $q(t)$ наблюдается перегиб, к которому и рекомендуется приурочивать восстановительные мероприятия [1]. Удельный дебит скважины во времени может быть представлен эмпирической зависимостью [2]

$$q_t = qe^{-\beta t}, \quad (1)$$

q, q_t – удельные дебиты скважины на момент обследования и через рассматриваемый промежуток времени; β – коэффициент старения скважины.

Определим межремонтный период работы T_p водозабора с учетом перечисленных факторов при условии $S_j \leq S_{j\text{доп}}$.

В общем случае баланс напоров потока в трубопроводе с включенным в него насосом, забирающим воду из n -й скважины водозабора (рис. 1), описывается уравнением

$$H_n^H = S_n + H_n + Z_n + \Delta H_n, \quad (2)$$

где H_n^H – напор насоса; S_n – понижение в скважине; H_n – расстояние от устья скважины до статического уровня; Z_n – геометрический напор; ΔH_n – суммарные потери напора: в колонне водоподъемных труб длиной l'_n , линии подключения скважины к сборному водоводу

длиной l_n , на участках сборного водовода $\sum_1^{n-1} L$,

на конечном участке L_0 .

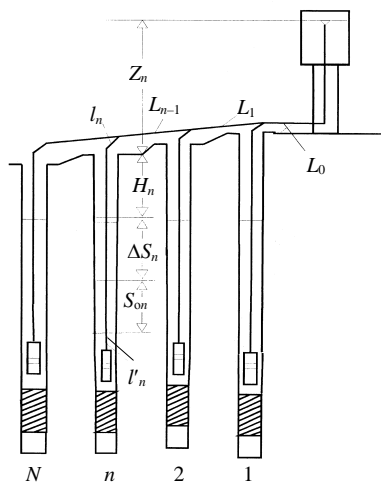


Рис. 1. Расчетная схема водозабора

Рассмотрим входящие в уравнение (2) слагаемые.

Насос скважины развивает напор в соответствии с рабочей характеристикой, которая может быть аппроксимирована выражением

$$H_n^H = a_n - b_n Q^2, \quad (3)$$

где a_n – некоторый фиктивный напор насоса; b_n – коэффициент кривой $H_n^H(Q)$ насоса, харак-

теризующий его фиктивное гидравлическое сопротивление.

Величины a и b приводятся обычно в каталогах для каждого насоса как справочные. Для любого насоса они могут быть определены также непосредственно из рабочей характеристики насоса $H^H(Q)$, представленной в графической форме по двум точкам с координатами I ($H_I^H; Q_I$) и II ($H_{II}^H; Q_{II}$):

$$b_n = \frac{H_I^H - H_{II}^H}{Q_{II}^2 - Q_I^2}; \quad (4)$$

$$a_n = [H_I^H + H_{II}^H + b_n(Q_I^2 + Q_{II}^2)]/2. \quad (5)$$

Понижение S_n в скважине, находящейся в составе водозабора подземных вод, может быть представлено на основе результатов откачек в виде суммы трех слагаемых [3]

$$S_n = S_{on} + \Delta S_n + \Delta S_n(t), \quad (6)$$

где S_{on} – понижение уровня, вызванное откачкой из данной скважины в условиях ее одиночной работы без учета влияния взаимодействующих скважин; ΔS_n – понижение (срезка) уровня в этой же скважине, обусловленное влиянием всех совместно работающих скважин; $\Delta S_n(t)$ – дополнительное понижение уровня в n -й скважине, происходящее с течением времени в результате общей сработки запасов подземных вод в пласте.

Обозначим через S'_n понижение уровня воды в скважине с учетом влияния взаимодействующих скважин водозабора. Тогда

$$S'_n = S_{on} + \Delta S_n. \quad (7)$$

Общее понижение S_n в скважине

$$S_n = S'_n + \Delta S_n(t). \quad (8)$$

Характеристика скважины как функция понижения S_{on} от ее дебита Q_n , полученная на основе опытных откачек в период обследования водозабора, может быть представлена прямой или чаще криволинейной зависимостью.

В первом случае удельный дебит q_n скважины остается неизменным при всех понижениях S_{on}

$$q_n = \frac{Q_n}{S_{on}} = \text{const.} \quad (9)$$

Во втором случае удельный дебит q_n уменьшается с понижением S_{on} по закону кривой линии, а зависимость между S_{on} и Q_n является степенной [3]

$$S_{on} = pQ_n^m, \quad (10)$$

где p, m – параметры, определяемые на основании результатов откачек.

Тогда удельный дебит равен

$$q_n = \frac{Q_n}{S_{on}} = \frac{Q_n^{1-m}}{p}. \quad (11)$$

При $m = 1$ зависимость (11) приводится к виду (9)

$$q_n = \text{const.}$$

Однако наиболее теоретически обоснованной является двучленная зависимость между S_{on} и Q_n

$$S_{on} = A Q_n + B Q_n^2, \quad (12)$$

где A и B – параметры, определяемые по результатам обследования скважины.

Тогда зависимость для удельного дебита будет иметь вид

$$q_n = \frac{Q_n}{S_{on}} = \frac{1}{A + B Q_n}. \quad (13)$$

Характеристику скважины $S_{on}(t)$ с учетом кольматации (1) можно представить в виде

$$S_{on}(t) = \frac{Q_n}{q_n} e^{\beta t}. \quad (14)$$

Срезка уровня ΔS_n при произвольном расположении скважин в неограниченном напорном пласте может быть определена по формуле Форхгеймера [3]

$$\Delta S_n = \frac{\sum_{j=1}^n \nabla Q_j \ln \left(\frac{R_j}{r_{jn}} \right)}{2\pi k m}, \quad (15)$$

где Q_j – производительность воздействующей скважины; R_j – радиус влияния воздействующей скважины; r_{jn} – расстояние между рассмат-

риваемой и воздействующей скважинами; ∇ – индекс, указывающий на то, что из суммы исключен член $j = n$; k – коэффициент фильтрации; m – мощность пласта.

Срезку уровней можно определить экспериментально: во время откачек из скважин параллельно осуществляют замеры изменения уровней воды в соседних, связанных с ними скважинах. В общем случае, когда скважина находится во взаимодействии с несколькими скважинами, ее удельный дебит q может быть представлен по методу М. Е. Альтовского [4]

$$q'_n = q_n \left(1 - \sum_{j=1}^n \nabla \alpha_{j,n} \right), \quad (16)$$

где $\sum_{j=1}^n \nabla \alpha_{j,n}$ – суммарный коэффициент снижения дебита, равный сумме коэффициентов снижения дебита $\alpha_{j,n}$ от влияния всех j -х скважин, взаимодействующих с n -й скважиной.

В основу данного метода положено допущение о том, что характеристика одиночно работающей скважины не меняется при совместном действии группы скважин.

Тогда дебит скважины Q_n с учетом выражений (7) и (16) равен

$$Q_n = S'_n q'_n = S'_n q_n \left(1 - \sum_{j=1}^n \nabla \alpha_{j,n} \right). \quad (17)$$

Отсюда понижение S'_n в скважине с учетом взаимодействия и кольматации во времени составляет

$$S'_n(t) = \frac{Q_n}{q_n \left(1 - \sum_{j=1}^n \nabla \alpha_{j,n} \right)} e^{\beta t}. \quad (18)$$

Последнее слагаемое в правой части уравнения (6) – $\Delta S_n(t)$ – в пластах с постоянно действующими источниками восполнения запасов подземных вод – вблизи рек, водохранилищ, при наличии гидравлической связи с другими водообильными горизонтами – можно принять равным 0, так как фильтрация в этих случаях приобретает установившийся характер [3].

В начальный период эксплуатации водозабора, характеризующийся неустановившейся

фильтрацией, для нахождения $\Delta S_n(t)$ используют данные откачек, выраженные в виде графиков $S_{on} = f(Q_i, t)$, где S – понижение уровня при постоянном расходе Q_i ; t – время [3].

В процессе длительной эксплуатации водозабора скорость снижения уровня из-за сработки запасов подземных вод заметно уменьшается, поэтому при расчете прогноза снижения производительности водозаборов со значительным временем эксплуатации $\Delta S_n(t)$ можно не учитывать. Измеряемое во время обследования водозабора значение H_n в каждой скважине уже учитывает сработку запасов $\Delta S_n(T_s)$ подземных вод за период времени T_s от сооружения скважины до момента ее обследования. Поэтому при длительной эксплуатации водозабора к моменту его обследования и небольшой величине межремонтного периода $\Delta S_n(T_s + t)$ изменится незначительно, и им также можно пренебречь.

Выражение для суммарных потерь напора имеет вид

$$\Delta H_n = (l_n A_h) Q_n^2 + (l_n A_h) Q_n^2 + L_0 A_b \sum_{j=1}^N Q_j^2 + L \sum_{i=1}^{n-1} A_i \left(\sum_{j=1}^N Q_j - \sum_{j=1}^{n-1} Q_j \right)^2, \quad (19)$$

где A – удельное сопротивление по длине трубы.

Подставив в уравнение (2) выражения (3), (6), (14), (15), получим систему из N уравнений для расчета N неизвестных Q_n

$$b_n Q_n^2 + \frac{Q_n e^{\beta t}}{q_n} + \frac{\sum_{j=1}^n \nabla Q_j \ln \left(\frac{R_j}{r_{jn}} \right)}{2\pi km} + \Delta S_n(t) + H_n + Z_n + \Delta H_n - a_n = 0, \quad (20)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, N$.

В системе (20) взаимодействие скважин учитывается по формуле Форхгеймера (15).

Подставив в уравнение (2) выражения (3), (6), (18), также получим систему из N уравнений для расчета N неизвестных Q_n

$$b_n Q_n^2 + \frac{e^{\beta t}}{q_n \left(1 - \sum_{j=1}^n \nabla \alpha_{j,n} \right)} Q_n + \Delta S_n(t) + H_n + Z_n + \Delta H_n - a_n = 0, \quad (21)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, N$.

В системе (21) взаимодействие скважин учитывается по методу М. Е. Альтовского.

Задача по определению величины Q_n сводится к многократному решению систем уравнений (20) или (21) для различных периодов времени t . По результатам расчетов строятся графики $Q_n = f(t)$ и $\sum_{j=1}^N Q_j = f(t)$. Если в задаче

задано значение минимально допустимой суммарной подачи Q_s , определяемой нормой водопотребления населенного пункта, то по графику $\sum_{j=1}^N Q_j = f(t)$ по заданной величине Q_s находится межремонтный период водозабора $t = T_p$.

Основой для получения правильных результатов расчета фактических режимов работы водозаборов подземных вод является достоверность используемых исходных данных: расчетной схемы водозабора, параметров пластов, характеристик скважин и насосов, коэффициентов гидравлического сопротивления трубопроводов, уровневого режима скважин и резервуаров.

Для эксплуатируемого водозабора производится натурное обследование работы всех его элементов в следующей последовательности.

1. Сначала производятся опытно-эксплуатационные откачки на выброс на всех скважинах водозабора при их одиночной работе с отключением от сборного водовода. Практически установившимся статическим уровнем H_n считается такой уровень, который колеблется около определенной отметки (с учетом введенных поправок), изменяясь не более чем на 1–2 см за 4–6 ч [5]. При откачке практически установившимся динамическим уровнем считается такой, который при постоянном дебите скважины изменяется также не более чем на 1–2 см за 4–6 ч [5]. Во время откачек измеряются расход воды Q , понижение уровня в скважине S , показание манометра p_m насоса, потребляемая мощность его электродвигателя N_n и величина $\cos\phi$. Все испытания повторяют, начиная с максимальной производительности и последовательно доводя ее до нуля. Затем идут в обратном направлении, доводя расход до максимума.

Для получения графиков $S_{on} = f(Q_n)$ подбирают наиболее подходящие зависимости вида (10) или (12) и определяют для расчетов соот-

ветствующие функции $q_n = f(Q_n)$: (11) или (13). Полученные характеристики насосов $H_n^a = f(Q_n)$ аппроксимируют зависимостями вида (3).

Используя данные более ранних наблюдений, для скважин строят экспериментальные кривые $q(t)$ и путем аппроксимации их экспоненциальными зависимостями вида (1) определяют коэффициенты старения скважин β .

2. Следующий этап – определение коэффициента фильтрации k (15) по данным восстановления уровней [5] после откачки воды из скважины. Используется графоаналитический метод обработки, в соответствии с которым по данным восстановления уровня строится полуположительный график зависимости величины повышения уровня Π от логарифма времени $\Pi = f(\lg t)$. График $\Pi = f(\lg t)$ выражается прямой, уравнение которой имеет вид

$$\Pi = E + C \lg t, \quad (22)$$

где Π – повышение уровня, замеренное относительно уровня перед остановкой насоса в скважине; t – время, исчисляемое от момента остановки откачки; E – начальная ордината, определяемая как отрезок, отсекаемый от оси ординат; C – угловой коэффициент.

Угловой коэффициент подсчитывается по формуле

$$C = \frac{\Pi_2 - \Pi_1}{\lg t_2 - \lg t_1}, \quad (23)$$

где Π_1, Π_2 – повышение уровня в скважине соответственно в моменты времени t_1, t_2 .

Коэффициент фильтрации находим по формуле

$$k = \frac{1,83Q}{ct}, \quad (24)$$

где m – мощность пласта; Q – дебит скважины перед остановкой.

Формула является универсальной для расчета как совершенных, так и несовершенных скважин. Так как восстановление уровня воды в скважине во времени не зависит от сопротивления фильтра, формула (24) позволяет определять величину k независимо от степени кольматации фильтра.

Коэффициенты снижения дебита $\alpha_{j,n}$ определяются по данным одиночных откачек при-

менительно к условиям равенства или неравенства понижений:

- при условиях равенства понижений

$$\alpha_{j,n} = \frac{\Delta S_n}{S_j + \Delta S_n}, \quad (25)$$

где ΔS_n – срезка уровня в n -й скважине при откачке из j -й скважины; S_j – понижение в j -й скважине;

- при условиях неравенства понижений

$$\alpha_{j,n} = \frac{\Delta S_n S_j}{S_j S_n + \Delta S_n S_j}, \quad (26)$$

где S_n – понижение в n -й скважине.

3. Определяется вид зависимости $\Delta S_n(t)$, входящей в уравнение (6), если водозабор работает в неустановившемся режиме. Строятся графики $S_{on} = f_i(Q_i, t)$ для каждой скважины по данным наблюдений за весь период эксплуатации скважины T_s и аппроксимируются эмпирической зависимостью. Задаваясь продолжительностью работы скважины после обследования t и дебитом скважины Q_n , находят ΔS_n на момент времени $(T_s + t)$ и подставляют в уравнение (20) или (21).

4. Подбор насосного оборудования скважин может производиться графическим методом (рис. 2). Для этого фактическую характеристику скважины 1 наносят на координатную сетку $Q-H$.

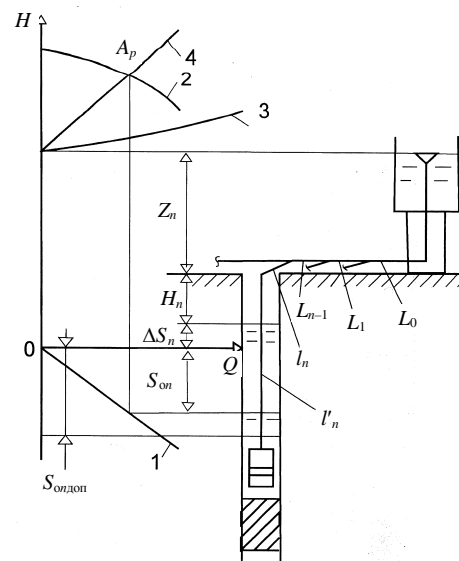


Рис. 2. Гидравлические характеристики водозаборного сооружения: 1 – скважины; 2 – трубопровода; 3 – скважины и трубопровода; 4 – насоса

Для нового насоса используется его паспортная характеристика, которую в виде кривой 2 также наносят на координатную сетку $Q-H$.

Фактическая напорная характеристика 2 насосного агрегата строится по измеренным значениям Q и рассчитанным значениям напоров насоса H^H

$$H^H = h_m + S + \Delta h + \frac{P_m}{\rho g}, \quad (27)$$

где h_m – геометрическая высота положения центра манометра над статическим уровнем воды в скважине; S – понижение в скважине при данном Q ; Δh – потери напора от насоса до точки подключения манометра; p_m – показание манометра.

Характеристика трубопровода 3 представляет собой суммарную характеристику потерь напора $\Delta H = f(Q)$: в колонне водоподъемных труб длиной l' , линии подключения скважины к сборному водоводу длиной l , на участках сборного водовода L , конечном участке L_0 , т. е. на всем протяжении от насосного агрегата до резервуара. Для эксплуатируемых водозаборов значения A определяются экспериментальным путем. С этой целью производят так называемую моментальную или одновременную пьезометрическую съемку водозабора при заданном постоянном режиме работы всех элементов. В процессе этой съемки определяются расходы воды в трубопроводах и фиксируются соответствующие пьезометрические напоры в характерных точках водоводов с помощью манометров соответствующего класса точности.

Значения A определяют по формуле

$$A = \frac{\left(Z_1 + \frac{P_1}{\rho g}\right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\rho g}\right)}{lQ}, \quad (28)$$

где Z_1, p_1, Z_2, p_2 – геометрические высоты центров тяжести и показания манометров в сечениях трубопроводов в начале и конце рассматриваемого участка постоянного сечения; Q – расход воды на участке.

Суммарная характеристика 4 скважины и трубопровода получается путем сложения кривых 1 и 3 вдоль оси H при $Q = \text{const}$.

Точка пересечения (рабочая точка) характеристики насоса 2 и суммарной характеристики скважины и трубопровода 4 позволяет опреде-

лить производительность насоса Q и динамический уровень в скважине. Необходимо, чтобы при работе насоса скважины на резервуар, когда все остальные скважины выключены, общее понижение в скважине не превышало максимально допустимое понижение уровня $S_{\text{доп}}$, т. е. $S < S_{\text{доп}}$, а рабочая точка соответствовала области максимальных значений КПД насоса.

Полученные значения дебитов скважин Q_n могут быть использованы как предварительные величины расходов для решения систем уравнений вида (20) или (21), которые решаются методом итераций.

В общем случае в исходных уравнениях системы расчета межремонтных периодов водозабора могут быть также учтены износ насосного оборудования и увеличение шероховатости трубопроводов, происходящие во времени.

ВЫВОД

1. Получена система алгебраических уравнений динамического равновесия действующего водозабора подземных вод с учетом взаимного влияния скважин и кольматации их фильтров. Решение системы позволяет рассчитать изменение производительности водозабора во времени и обосновать сроки проведения восстановительных мероприятий на скважинах.

2. Предложена методика проведения натурального обследования скважин и водоводов с целью получения необходимых исходных данных для решения системы уравнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 334 с.
2. Гаврилко, В. М. Опыт эксплуатации скважин, оборудованных фильтрами из пористой керамики / В. М. Гаврилко, Н. Д. Бессонов. – Труды ВНИИводгео, 1966. – Вып. 13. – С. 8–10.
3. Арцев, А. И. Проектирование водозаборов подземных вод / А. И. Арцев [и др.]. – М.: Стройиздат, 1976. – 292 с.
4. Дубровский, В. В. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду / В. В. Дубровский [и др.]. – М.: Недра, 1972. – 512 с.
5. Инструкция и методические указания по определению коэффициентов фильтрации водоносных пород методом опытных откачек из скважин. И-38–67. – М.: Энергия, 1967. – 184 с.

Поступила 20.01.2005