

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 прифильтровых 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, прифильтровых 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 .

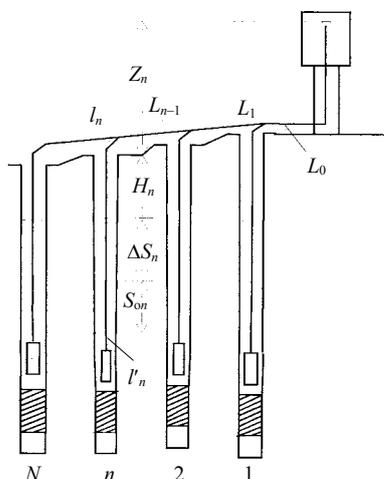


Рис. 1. Расчетная схема водозабора

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 ($H_{II}^H; Q_{II}$):

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

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

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

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

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

$$\Delta H_n = (l_n A_n) Q_n^2 + (l_n A_n) Q_n^2 + L_0 A_0 \sum_{j=1}^N Q_j^2 + L \sum_{i=1}^{n-1} A_i \left(\sum_{j=1}^N Q_j - \sum_{j=1}^{n-1} Q_j \right)^2, \quad (19)$$

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 $H^n = f(Q_n)$ 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

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

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-

нительно 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 $S_{on} = f_1(Q_i, t)$ 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 $Q-H$.

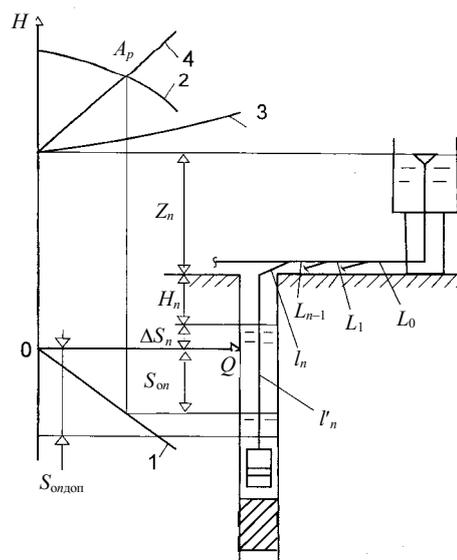


Рис. 2. Гидравлические характеристики водозаборного сооружения: 1 – скважины; 2 – трубопровода; 3 – скважины и трубопровода; 4 – насоса

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