

## **ПРОГНОЗ СНИЖЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ДЕБИТА СКВАЖИН В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**В.В. Ивашечкин**, доктор технических наук

**А.М. Шейко**, кандидат технических наук

**Э.И. Михневич**, доктор технических наук

Белорусский национальный технический университет

**Ключевые слова:** скважина, кольматаж, регенерация, удельный дебит, производительность водозабора

### **Введение**

Водоснабжение крупных населенных пунктов и системы вертикального дренажа в основном базируется на подземных водах, и обеспечивается одним или несколькими скважинными водозаборами. В процессе эксплуатации удельный дебит водозаборных скважин и всего водозабора снижается из-за явлений механического, биологического и химического кольматажа фильтров и прифильтровых зон скважин. Химический кольматаж является неизбежным процессом. Даже при качественном выполнении буровых работ, при эксплуатации скважины, из-за появления гидродинамического возмущения в пласте, смещается газовое равновесие в подземной воде, следствием чего является выпадение в осадок на фильтре и прифильтровой зоне труднорастворимых соединений железа, кальция, марганца, кремния. Для поддержания суммарной производительности водозабора подземных вод на необходимом уровне производят восстановительные работы на скважинах для удаления кольматирующих отложений, перебуривают и тампонируют недопустимо снизившие дебит и вышедшие из строя скважины. В связи с этим, для планирования восстановительных работ на каждой конкретной скважине и буровых работ в целом по скважинному водозабору, необходимо знать интенсивность снижения во времени удельной производительности скважин и суммарной производительности водозабора. Поэтому цель работы заключалась в разработке методики расчета суммарной производительности скважинных водозаборов во времени на основе прогноза снижения удельной производительности водозаборных скважин в результате кольматажа.

Расчетам притока воды к скважинам и комплексным расчетам водозаборов подземных вод посвящены работы В.С. Алексеева, Н.А. Плотникова, Ф.М. Бочевера, Н.Д. Бессонова, В.П. Старинского., и др. [1–6].

Интенсивность снижения во времени удельного дебита скважин одного и того же водозабора подземных вод неодинакова, так как зависит от целого комплекса факторов:

конструкции конкретной скважины, ее производительности, качества освоения и вида водоносного горизонта, гидрогеологических условий в месте ее бурения, химического состава воды и т.д. Поэтому учесть все эти факторы, спрогнозировать снижение суммарной производительности всего водозабора во времени и определить период его устойчивой работы на стадии проектирования водозабора можно только с определенной долей вероятности [1].

**Основная часть**

Известно, что сопротивление фильтров скважин, обусловленное химическим кольматажем, изменяется по закону, близкому к экспоненциальному, но с некоторым периодом запаздывания [2]. Изменение удельных дебитов скважин подчиняется эмпирической зависимости [3–4]

$$q_t = q_0 \cdot e^{-\beta t} \quad (1)$$

где  $q_t, q_0$  – текущий и начальный удельные дебиты скважины, м<sup>2</sup>/ч;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий изменения удельного дебита скважины в связи с кольматажем (коэффициент старения скважины);  $t$  – время, год.

Для определения закономерностей снижения удельного дебита во времени были обработаны материалы наблюдений работы скважин 11-ти водозаборов г. Минска [7].

**Таблица 1 – Значения параметров интенсивности снижения удельных дебитов**

Водоносный горизонт	Днепровский-сожский						Верхне-протерозойский
	ударно-канатный способ бурения			роторный способ бурения			
Тип буровой установки	УКС-22м УКС-30м	УКС-22м УКС-30м	УКС-22м УКС-30м	ФА-12 (обратная промывка)	УРБ-3АМ	УРБ-3АМ 1БА-15В	
Тип фильтра	Трубчатый с проволочной обмоткой и гравийной обсыпкой	Трубчатый с проволочной обмоткой	Каркасно-стержневой с гравийной обсыпкой	Трубчатый с проволочной обмоткой и с гр. обсыпкой	Трубчатый с проволочной обмоткой	Трубчатый с проволочной обмоткой	
средние значения: коэффициента $\beta$ / рационального срока регенерации, год							
	0,099/2,9	0,077/3,7	0,139/2,1	0,115/2,5	0,068/4,2	0,019/14,6	

Данные изменения удельного дебита каждой скважины аппроксимировали экспоненциальной функцией, определяли рациональный межремонтный период, как период снижения удельного дебита  $q_0$  на 25 %, и значение коэффициента  $\beta$ .

Результаты изучения интенсивности снижения удельного дебита для скважин 11-ти водозаборов г. Минска, пробуренных различными способами, представлены в табл. 1 [7]. Из данных таблицы следует, что минимальные значения  $\beta$  (0,019) и, соответственно, максимальные значения рациональных сроков регенерации (14,6 года) характерны для

скважин верхнепротерозойского водоносного горизонта, сложенного трещиноватыми отложениями. Из скважин днепровского-сожского горизонта наименьшую интенсивность «старения» имеют скважины, пробуренные без устройства гравийных обсыпок. Их коэффициенты старения  $\beta$  не превышают значений 0,068 (ротормый способ) и 0,077 (ударно-канатный способ), в то время как у скважин с гравийными обсыпками значения  $\beta$  на 20–40 % больше (табл. 1).

Одной из причин такого положения может являться то, что в начальный период эксплуатации этих скважин происходит интенсивное уплотнение гравийной обсыпки в прифилтровой зоне, вызванное, как правило, неверным подбором гранулометрического состава самой гравийной смеси, и несоблюдением требуемой продолжительности откачки при освоении скважин. Поэтому удельные дебиты таких скважин имеют тенденцию резко уменьшаться в первые годы эксплуатации, но, несмотря на это, они имеют достаточно большой удельный дебит в течение многих лет. Анализ результатов показывает, что практически во всех рассмотренных случаях прослеживается тенденция роста интенсивности снижения удельного дебита скважин в зависимости от величины абсолютных значений их первоначальных удельных дебитов  $q_0$ . Например в скважинах, пробуренных роторным способом с обратной промывкой, имеющих гравийную обсыпку, с ростом  $q_0$  от 2 до 50 м<sup>3</sup>/ч коэффициент  $\beta$  возрастает от 0,087 до 0,138, а их рациональный срок регенерации уменьшается с 3,3 до 2,1 года [7]. Для исследования этой закономерности была проанализирована работа 209-ти скважин, оборудованных разными фильтрами и пробуренных в различных гидрогеологических условиях. Расчеты показали, что между первоначальными удельными дебитами и значениями  $\beta$  установилась обратная связь с коэффициентом корреляции  $r = -0,51$ . Это означает, что при большем первоначальном удельном дебите темпы снижения удельного дебита скважины будут увеличиваться. Одной из причин этого является неправильный подбор насосов и высокие эксплуатационные расходы, которые значительно превышают проектные дебиты скважин. В итоге интенсифицируется химический кольматаж из-за роста объема отложений, пропорционального количеству воды, прошедшему через фильтр [7].

Анализ влияния способа бурения на значения коэффициента  $\beta$  при одинаковых конструкциях фильтров показал, что значения  $\beta$  у скважин, пробуренных роторным способом, на 5–20 % выше, чем у скважин, пробуренных ударно-канатным способом. Это объясняется тем, что применение при роторном бурении в качестве промывочной жидкости буровых растворов и даже чистой воды (из-за нахождения в кровле горизонта глинистых пород и наработки бурового раствора) не гарантирует остаточной кольматации в порах грунта на контактных зонах. В скважинах, пробуренных роторным способом, рыхлая гравийная обсыпка в начальный период интенсивно уплотняется при пусках-

остановках погружных насосов, что приводит к резкому снижению пористости и увеличению коэффициента старения  $\beta$ .

На 203-ти проанализированных скважинах первые текущие ремонты проводились в среднем через 14 лет при среднем понижении удельного дебита на 45 %, что негативно сказалось на степени извлечения кольтманта и сроке службы скважин. Эффективность таких ремонтов ниже, чем ожидаемая, так как происходит дегидратация, упрочнение неудаленного вовремя кольтманта, что затрудняет дальнейшую регенерацию фильтра и вынуждает прибегнуть к замене фильтра, либо к перебурированию скважины.

Определим время, за которое произойдет уменьшение производительности  $Q_D$  работающего водозабора до значения, равного фактическому водопотреблению  $Q_S$  снабжаемого водой населенного пункта. Исходными данными являются материалы натурного обследования водозабора: расчетная схема расположения скважин и сбора воды (рис. 1); характеристики скважин; взаимовлияние скважин и параметры пластов.

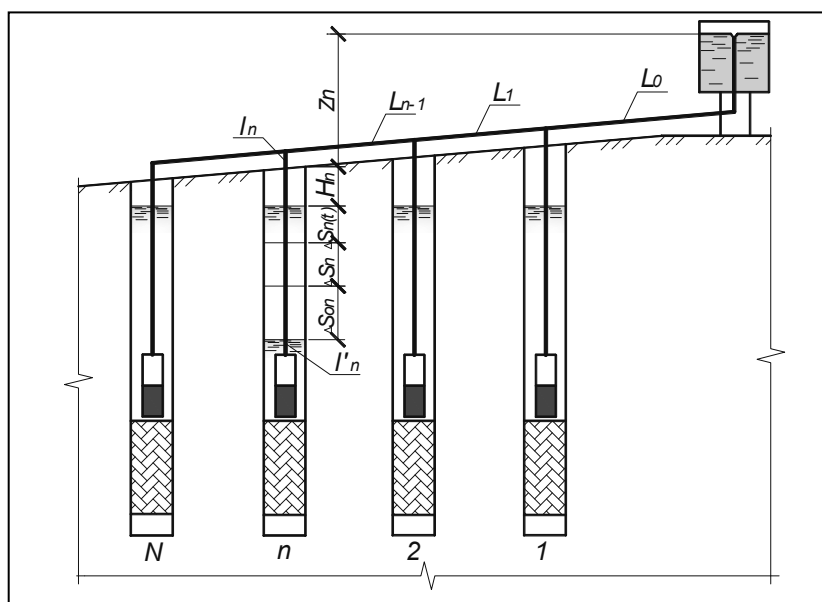


Рисунок 1 – Схема водозабора

Система нелинейных уравнений, каждое из которых представляет собой баланс напоров потока в трубопроводе с включенным в него насосом, забирающим воду из  $n$ -ой скважины водозабора, состоит из  $N$  уравнений, равных числу скважин водозабора с неизвестными дебитами  $Q_n$ . Уравнение для скважины  $n$ -ой водозабора имеет вид

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

где  $H_n^H$  – напор насоса;  $S_n$  – изменение понижения в скважине во времени;  $H_n$  – расстояние от устья скважины до статического уровня;  $Z_n$  – геометрический напор;  $\Delta H_n$  – суммарные потери напора в колонне водоподъемных труб длиной  $l'n$ , линии подключения к сборному водоводу длиной  $ln$  и на участках сборного водовода и  $\sum_1^{n-1} L$  конечном участке  $L_0$ .

Выражение для напора насоса можно аппроксимировать в виде

$$H_n^H = a_n - e_n \cdot Q^2 \quad (3)$$

где  $a_n$  – некоторый фиктивный напор насоса;  $e_n$  – коэффициент кривой  $H_n^H(Q)$  насоса, характеризующий его фиктивное гидравлическое сопротивление.

Понижение в  $n$ -ой скважине  $S_n$  может быть представлено в виде [5]

$$S_n = S_{on} + \Delta S_n + \Delta S_n(t) \quad (4)$$

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

Обозначим через  $S'_n$  понижение в  $n$ -ой скважине с учетом влияния взаимодействующих с ней скважин

$$S'_n = S_{on} + \Delta S_n \quad (5)$$

Удельный дебит  $q'_n$   $n$ -ой скважины с учетом влияния взаимодействия можно найти по методу М. Е. Альтовского [8–10]

$$q'_n = q_n \left( 1 - \sum_{j=1}^n \nabla \alpha_{j,n} \right) \quad (6)$$

где  $\left( \sum_{j=1}^n \nabla \alpha_{j,n} \right)$  – суммарный коэффициент снижения дебита, равный сумме

коэффициентов снижения дебита  $\alpha_{j,n}$  влияния всех  $j$ -х скважин, взаимодействующих с  $n$ -ой скважиной;  $q_n$  – удельный дебит скважины на момент обследования при ее одиночной работе; индекс  $\Delta$  указывает на то, что из суммы исключен член  $j = n$ .

Метод Альтовского основан на наложении фильтрационных течений и является теоретически обоснованным, поэтому он обладает в известной мере универсальностью, т.е. может быть применен для различных схем расположения скважин и условий их работы.

Коэффициенты снижения дебита  $\alpha_{j,n}$  определяются по данным одиночных откачек применительно к условиям равенства или неравенства понижений в скважинах при их одновременной работе. Величины указанных коэффициентов можно принимать постоянными для всех понижений в скважинах.

Расчеты дебитов и понижений взаимодействующих скважин следует производить в пределах экстраполяции, принятых для соответствующих функций, выражающих зависимость дебита от понижения в невзаимодействующих скважинах:  $q = Q/S_0 = (A + BQ)^{-1}$ , или  $q = Q/S_0 = b$ , где коэффициенты  $A$  и  $b$  характеризуют суммарные сопротивления фильтра и прифильтровой зоны, коэффициент  $B$  – дополнительные сопротивления при отклонении от линейного закона фильтрации [8]. Эти функции используют для нахождения  $q_n$  в формуле (6).

Тогда дебит скважины  $Q_n$  с учетом взаимодействия равен

$$Q_n = S'_n q'_n = S'_n q_n \left( 1 - \sum_{j=1}^n \nabla \sigma_{j,n} \right) \quad (7)$$

В результате кольматации фильтра удельный дебит скважины непрерывно уменьшается и его изменение во времени может быть представлено эмпирической зависимостью (1).

Тогда дебит скважины с учетом взаимодействия и кольматажа

$$Q_n = S'_n q'_{n(t)} = S'_n q_n e^{-\beta t} \left( 1 - \sum_{j=1}^n \nabla \sigma_{j,n} \right) \quad (8)$$

Отсюда понижение в скважине с учетом взаимодействия и роста кольматажа во времени

$$S'_{n(t)} = Q_n e^{\beta t} / \left[ q_n \left( 1 - \sum_{j=1}^n \nabla \sigma_{j,n} \right) \right] \quad (9)$$

Величиной  $\Delta S_n(t)$  в выражении (4) в пластах с постоянно действующими источниками восполнения запасов подземных вод (реками, водохранилищами) и при наличии гидравлической связи с другими водообильными горизонтами пренебрегают, так как

фильтрация в этих случаях приобретает установившийся характер. В процессе длительной эксплуатации водозабора величина  $\Delta S_n(t)$  уменьшается и ее также можно не учитывать. Кроме того, измеряемое значение  $H_n$  учитывает сработку запасов подземных вод, произошедшую от момента бурения скважины до момента обследования водозабора, и при небольшой величине периода стабильной производительности водозабора, величиной  $\Delta S_n(t)$  также можно пренебречь.

Потери напора  $\Delta H_n$  в трубопроводах определяются по общей формуле

$$\Delta H_n = (l_n A_n) Q_n^2 + (l'_n A'_n) Q_n^2 + L_0 A_0 \sum_{j=1}^N Q_j^2 + L \sum_{i=1}^{n-1} A_i \left( \sum_{j=1}^N Q_i - \sum_{j=1}^{n-1} Q_j \right)^2 \quad (10)$$

где  $A$  – удельное сопротивление трубопроводов.

Подставив в уравнение (2) выражения (3), (4) и (9) получим

$$\epsilon_n Q_n^2 + Q_n e^{\beta t} / \left[ q_n \left( 1 - \sum_{j=1}^n \nabla \sigma_{j,n} \right) \right] + \Delta S_n(t) + H_n + Z_n + \Delta H_n - a_n = \Delta h_n \quad (11)$$

где  $\Delta h_n$  – невязки потерь напора по каждому из  $N$  уравнений, возникающие из-за того, что принятые значения  $Q_n$  не удовлетворяют системе уравнений.

Анализ уравнения (11) показывает, что с ростом времени  $t$  из-за кольматации фильтров происходит увеличение понижений в скважинах и уменьшение расходов  $Q_n$ , подаваемых в сеть, так как возрастают напоры насосов. Это приводит к уменьшению понижений (срезок) уровня в каждой скважине  $\Delta S_n$  и потерь напора  $\Delta H_n$  в трубопроводах водосборной сети. Очевидно, что чем больше  $q_n$  скважины и меньше  $\beta$ , тем медленнее во времени снижается величина второго слагаемого, производительность скважины и водозабора в целом. Нелинейная система уравнений вида (11) решается методом последовательных приближений.

#### **Пример расчета**

Водозабор представлен девятью водозаборными скважинами, одна из которых (№ 1) затампонирована (рис. 2). Скважины №№ 2, 3, 5 каптируют воду из четвертичных отложений. Фактическое водопотребление населенного пункта  $Q_s = 4500$  м<sup>3</sup>/сут. Скважины №№ 4, 6, 7, 8, 9 пробурены на дочетвертичные отложения.

Результаты обследования скважин представлены в табл. 2.

Для каждой скважины осуществляли предварительный подбор насосов графо-аналитическим способом. Полученные расходы являлись предварительными для расчета системы, составленной из 8 нелинейных уравнений, для решения которой создана

Таблица 2 - Результаты обследования скважин водозабора

№ скважины	Удельный дебит при бурении, $q_0$ , м <sup>3</sup> /ч	Удельный дебит при обследовании, $q_1$ , м <sup>3</sup> /ч	Время эксплуатации $t_3$ , лет	Коэффициент старения $\beta$	Геометрический напор $Z$ , м	Глубина статического уровня $H$ , м	Длина водоподъемных труб $l$ , м	Длина линии подключения $l_1$ , м	Диаметр водоподъемных труб $d'$ , мм	Диаметр линии подключения $d$ , мм	Суммарный коэф. снижения дебита, $\sum \alpha$
2	2	1	17	0,041	40	17,5	66	30	75	75	0,1
3	1,57	0,8	21	0,032	39,5	15	50	30	75	75	0,1
4	4,5	3,0	16	0,025	43,6	38,7	66	30	100	100	0,03
5	1,33	0,78	10	0,053	45	16	67	20	100	100	0,01
6	1	0,6	5	0,1	45,5	40	83	40	75	75	0,04
7	1,5	0,8	5	0,126	46,4	43,7	66	150	100	150	0,1
8	1,9	1,6	3	0,057	49,5	41,8	61	10	100	100	0,1
9	3,7	2,4	3	0,144	52	39	61	393	100	200	0,05

Таблица 3- Водоподъемное оборудование и понижения в скважинах

№ скважины	Марка насоса	$Q$ ( $t=0$ ), м <sup>3</sup> /ч	$H$ ( $t=0$ ), м	$S$ ( $t=0$ ), м	$Q$ ( $t=2,67$ г.), м <sup>3</sup> /ч	$H$ ( $t=2,67$ г.), м	$S$ ( $t=2,67$ г.), м
2	1ЭЦВ8-25-100	27,54	94,80	30,35	26,62	96,69	32,72
3	1ЭЦВ8-25-100	26,20	97,53	36,40	25,40	99,11	38,41
4	ЭЦВ8-25-150	37,66	100,38	12,94	37,55	100,88	13,79
5	1ЭЦВ8-25-100	25,40	99,09	32,85	24,06	101,55	35,85
6	ЭЦВ8-25-150	26,40	145,30	45,88	24,21	152,36	54,90
7	ЭЦВ8-25-150	26,02	146,68	36,14	22,91	156,20	44,55
8	ЭЦВ8-25-150	32,57	122,67	22,88	31,90	125,30	26,10
9	ЭЦВ8-25-150	34,38	115,10	15,08	33,08	120,60	21,30



программа расчета. Расчетные данные по выбранному водоподъемному оборудованию представлены в табл. 3.

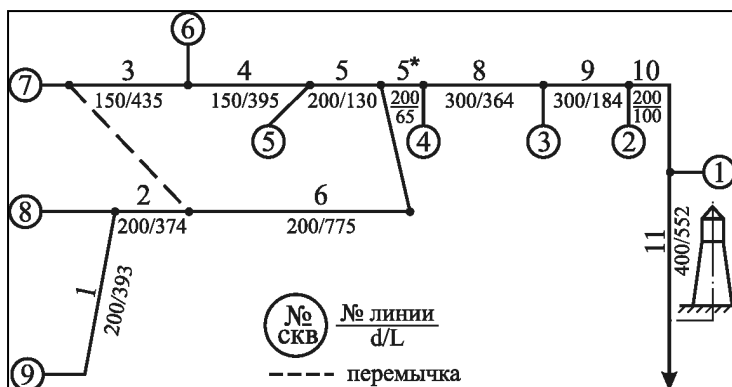


Рисунок 2 – Схема подключения скважин к сборному водоводу

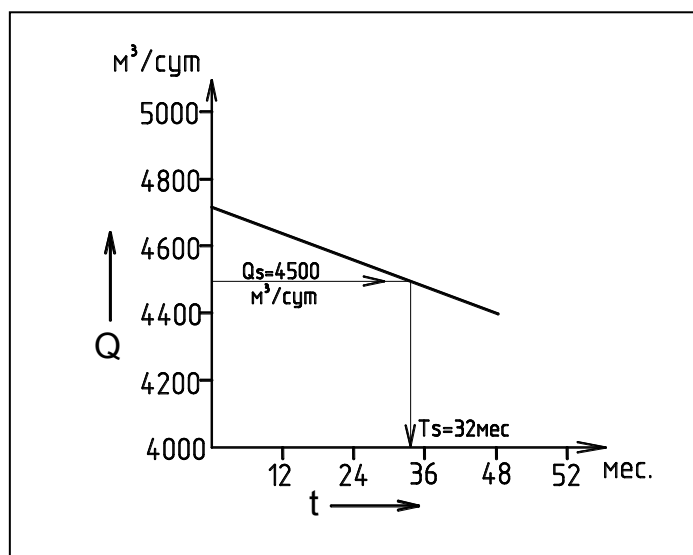


Рисунок 3 – График изменения во времени суммарной производительности водозабора

Система уравнений решалась на различные моменты времени с определением на каждом шаге по времени значений  $Q_n$ ,  $\sum Q_i$  и проверкой выполнения условия  $\sum Q_i > Q_s = 4500 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Определенный по графику  $\sum Q_i = f(t)$  при  $Q_s = 4500 \text{ м}^3/\text{сут}$  период работы водозабора от момента обследования составил  $T_s = 32$  месяца (2,67 года) (рис. 3). Из данных рис. 3 следует, что суммарная производительность водозабора некоторое время после обследования превышает водопотребление населенного пункта, однако с ростом сопротивления фильтров скважин в результате кольматажа происходит уменьшение

удельного дебита скважин  $q(t)$  и возрастают понижения  $S(t)$ , что приводит к уменьшению производительности водозабора.

Через промежуток времени  $T_s = 32$  месяца суммарный дебит скважин уменьшился до величины фактического водопотребления, т.е.  $\sum Q_i = Q_s = 4500$  м<sup>3</sup>/сут. Промежуток времени  $T_s$  можно считать временем устойчивой работы водозабора и поэтому на момент его окончания необходимо предусмотреть комплекс мероприятий по регенерации фильтров скважин.

### **Заключение**

1. Установлено, что рациональный межремонтный период декольматажа скважин зависит от вида водоносного горизонта, гидрогеологических условий, наличия гравийной засыпки и ее качества, правильности эксплуатации и мало зависит от абсолютных значений показателя Ризнера и количества растворенного в воде железа. Наименьшие значения коэффициентов старения скважин (0,019) получены для скважин верхнепротерозойского водоносного горизонта, наибольшие (0,068–0,139) – для скважин днепровско-сожского горизонта.

2. Разработана методика расчета межремонтного периода действующего водозабора подземных вод, который определяют как время, за которое произойдет уменьшение производительности  $Q_d$  работающего водозабора до значения, равного фактическому водопотреблению  $Q_s$  снабжаемого водой населенного пункта. На основе натуральных данных обследования водозабора составляют систему уравнений динамического равновесия водозабора подземных вод с учетом факторов кольматации и взаимного влияния скважин. Решение системы позволяет определить изменение производительности водозабора во времени, обосновать сроки проведения восстановительных мероприятий и осуществлять правильный подбор погружных насосов исходя из известных допустимых понижений уровня и предельно возможных производительностей скважин.

### **Литература**

1. Плотников, Н.А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод / Н.А. Плотников, В.С. Алексеев. – М.: Стройиздат, 1990. – 256 с.
2. Алексеев, В.С. Методика прогноза химического кольматажа водозаборных скважин / В.С. Алексеев. – «Водоснабжение и санитарная техника», 1968. – № 10. – С. 28–31.
3. Опытнo-фильтрационные работы / В.М. Шестаков, Д.Н. Башкатов, И.С. Пашковский [и др.]. – М., Недра, – 1974. – 204 с.
4. 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.
5. Проектирование водозаборов подземных вод / А.И. Арцев, Ф.М. Бочевер, Н.Н. Лапшин [и др.]. – М., Стройиздат. – 1976. – 292 с.
6. Старинский, В.П. Водозаборные и очистные сооружения коммунальных водопроводов: учеб. пособие / В.П. Старинский, Л.Г. Михайлик – Мн.: Выш. шк., 1989. – 269 с.

7. Шейко, А.М. Прогноз кольматажа скважин и определение рациональных сроков их регенерации / А.М. Шейко, В.В. Ивашечкин, В.А. Галицкий // Вестник БрГТУ. – 2006. – № 2(38). – С. 28–31.
8. Дубровский, В.В. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду / В.В. Дубровский, М.М. Керченский, В.И. Плохов. – М., Недра, 1972. – 512 с.
9. Альтовский, М.Е. Справочник гидрогеолога / М.Е. Альтовский. – Госгеолтехиздат, 1962. – 616 с.
10. Алексеев, В.С. Восстановление дебита водозаборных скважин / В. С. Алексеев, В. Т. Гребенников. – М: Энергия, 1987. – 270 с.

### Summary

*Ivashechkin V., Sheiko A., Mihnevich E.*

#### THE FORECAST OF WELL SPECIFIC YIELD DECREASE IN SERVICE

It is determined that the rational between repair period of decolmatage of wells depends on type of aquifer, hydrogeological conditions, availability of gravel backfill and its quality, the right service. It is less depends on absolute values of the Rizner and quantity of dissolved iron. It is made the method of between repair period calculations of actual water inlet of groundwater. It determines the time of productivity reduction  $Q_o$  of working water inlet to the value of actual water supply  $Q_s$  of a village. Based on natural data of water inlet survey it is made the system of equations of dynamic equilibrium of groundwater inlet taking into account colmatation factors and mutual influence of wells. Solution of the system determines the change of water inlet productivity in time as well as justifies terms of reparative actions and fulfills the correct selection of submersible pumps based on allowed reduced levels and the maximum possible performance of wells.

*Поступила 25 сентября 2012 г.*