

## АНАЛИЗ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН г. МИНСКА

Магистрант ШЕЙКО А. М., канд. техн. наук ИВАШЕЧКИН В. В.,  
инженеры ХОЛОДИНСКАЯ Н. В., МАКАРОВА Э. А.

Белорусский национальный технический университет

Целью статистического анализа работы скважин является выявление тех или иных факторов или закономерностей, включающих геологическое строение, конструкцию фильтра, гидрохимический состав подземных вод, режим эксплуатации, которые с различной степенью интенсивности влияют на продолжительность их работы.

Для оценки долговечности были проанализированы ликвидированные и действующие скважины 11 водозаборов г. Минска. Из 604 скважин, пробуренных с 1932 г. до настоящего времени, 224 считаются полностью вышедшими из строя, остальные 380 – действующими. Из действующих 380 скважин 337 подвергались ремонту. Средний их возраст составляет 25,3 года, максимальный – 70 лет, минимальный – 6 лет. Остальные 43 скважины работают без ремонта. Средний их возраст – 14,5 года, минимальный – 5 лет, максимальный – 42 года.

В качестве основного критерия оценки продолжительности работы скважин принята их средняя долговечность.

Скважины г. Минска капируют воду из двух водоносных горизонтов: верхнего – днепровско-сожского водно-ледникового и нижнего – верхнепротерозойского (отложения валдайской серии). Эксплуатационные запасы подземных вод днепровско-сожского водно-ледникового водоносного горизонта более чем в 6 раз превышают запасы верхнепротерозойского горизонта [1]. Поэтому на 11 водозаборах только 6 % скважин капируют воду из верхнепротерозойского водоносного горизонта.

Водовмещающие породы верхнего днепровско-сожского горизонта представлены разнородными песками, гравием, галькой. Горизонт перекрывается сожскими моренными отложениями, а подстилается днепровской мореной. Мощность водовмещающих пород колеблется от 15 до 45 м, и залегают они на глубине от 20 до 70 м. Статические уровни уста-

навливаются на глубине от 1,5 до 33 м, в среднем – 12,4 м, а динамические – от 4,1 до 58 м, в среднем – 19,4 м.

Водоносный валдайский терригенный горизонт верхнего протерозоя представлен разнородными песчаниками, в различной степени трещиноватыми и сцементированными, с прослоями алевролитов. Мощность этого горизонта колеблется от 20 до 100 м и залегает на глубине 220–315 м. Статические уровни устанавливаются на глубине 12–43 м, в среднем – 25,6 м, а динамические – 21,5–65 м, в среднем – 42 м [1].

По материалам УП «Минскводоканал» проанализировано распределение по долговечности (рис. 1) и относительным частотам этого распределения (рис. 2) 224 полностью вышедшие из строя скважины, пробуренные в 1932–1995 гг. Кривая плотности распределения скважин по долговечности характеризуется крутой левой и пологой правой ветвями, а также наличием максимума в интервале 16–20 лет.

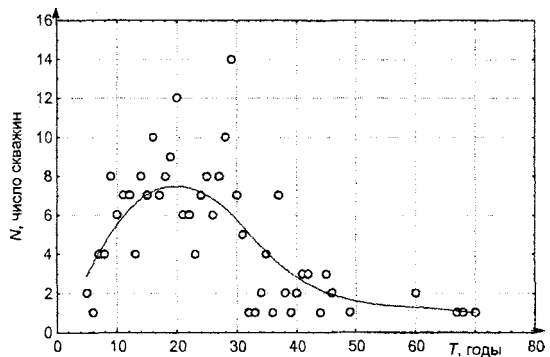


Рис. 1. График распределения скважин по долговечности

Наиболее близкой к истине оказалась модель распределения гамма-функции, обозначенная кривой линией на рис. 2. Это позволяет предполагать наличие единого закона гамма-распределения долговечности скважин, что дает возможность делать прогноз их долговечности.

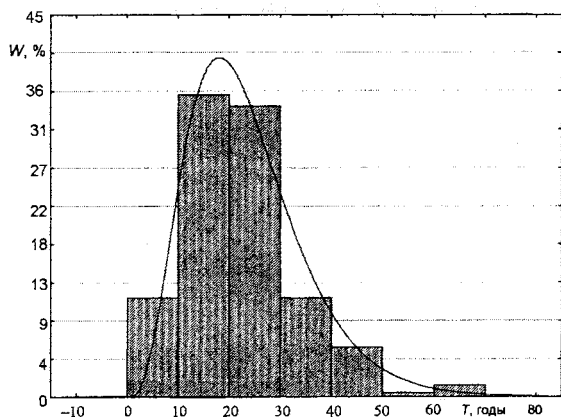


Рис. 2. Гистограмма относительных частот  $W$ -гамма распределения

Для принятой модели распределения были вычислены основные выборочные числовые характеристики (табл. 1). При этом установлено, что основное число вышедших из строя скважин имеет глубину менее 100 м и долговечность их не превышает 20 лет, максимальное значение удельного дебита составляет  $40 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м})$ , среднее –  $18 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м})$  и минимальное –  $1 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м})$ .

Согласно проанализированным данным основными причинами выхода из строя скважин являются химическая кольматация и пескование фильтров. В результате пескования наблюдался износ насосного оборудования.

Анализ зависимости первоначального удельного дебита и продолжительности работы ликвидированных скважин выявил общую тенденцию увеличения долговечности при высоком первоначальном удельном дебите. Очевид-

но, что одной из причин долговечности подобных скважин является уменьшение зоны турбулизации потока в прифильтровой зоне и отсутствие суффозионного выноса частиц. Тем самым создаются условия, близкие к условиям гидрхимического равновесия [2].

Таблица 1

Основные выборочные характеристики долговечности скважин

Описательная статистика	Значение
Количество наблюдений	224
Среднее арифметическое долговечностей	29,17
Доверительный интервал -95 %	24,23
Доверительный интервал +95 %	34,12
Среднее геометрическое	24,25
Медиана	27,5
Минимум	5
Максимум	70
Дисперсия	277,66
Среднее квадратическое отклонение	16,66
Стандарт	2,46
Асимметрия	0,728
Погрешность асимметрии	0,35
Экссесс	0,167
Погрешность эксцесса	0,687

Для изучения взаимосвязи долговечности скважин и наиболее широко применяемых типов фильтров были проанализированы полностью вышедшие из строя скважины (группа А) и скважины, продолжающие работать после ремонта (группа Б) (табл. 2).

Таблица 2

Взаимосвязь долговечности скважин и типа применяемого фильтра

Тип фильтра	Группа А										Группа Б									
	n	Q, м <sup>3</sup> /ч			q, м <sup>3</sup> /(\text{ч}\cdot\text{м})			t			n	Q, м <sup>3</sup> /ч			q, м <sup>3</sup> /(\text{ч}\cdot\text{м})			t		
		min	ср.	max	min	ср.	max	min	ср.	max		min	ср.	max	min	ср.	max	min	ср.	max
Проволочный	86	24	66	180	1	8	40	5	21	70	68	42	82	140	1	17	140	19	35	45
Проволочный с гравийной обсыпкой	23	28	67	130	1	8	20	5	19	68	148	17	87	165	2	24	260	6	22	37
Сетчатый	41	5	60	127	1	9	20	7	26	60	8	35	68	100	2	7	12	33	43	70
Каркасно-стержневой	6	12	72	120	1	13	40	6	25	49	7	–	–	–	2	16	45	18	26	56
Каркасно-стержневой с гравийной обсыпкой	6	18	61	108	3	13	31	6	30	47	6	50	85	120	4	14	20	20	22	25
Щелевой	5	20	38	50	3	3	5	5	14	21	3	–	48	–	4	9	16	32	37	46

Примечание: n – число скважин; Q – дебит скважины; q – удельный дебит; t – долговечность скважин, годы.

Результаты анализа показывают, что наибольшую долговечность имеют скважины, оборудованные сетчатыми, проволочными с гравийной обсыпкой и каркасно-стержневыми с гравийной обсыпкой фильтрами. Наблюдаемые ряды долговечности имеют в основном гамма и логнормальный законы распределения с наиболее вероятными долговечностями соответственно 20–30 лет для сетчатых фильтров, 20–25 лет – для фильтров проволочных с гравийной обсыпкой и каркасно-стержневых с гравийной обсыпкой.

Несмотря на относительно высокую долговечность сетчатых фильтров, следует иметь в виду, что эти фильтры из-за малых отверстий сетчатого полотна могут работать долгое время без пескования, но с низкими удельными дебитами. Уменьшение производительности сетчатых фильтров также объясняется тем, что они имеют большие входные сопротивления, быстро разрушаются под влиянием электрохимической коррозии и агрессивных вод [3]. Таким образом, применение сетчатых фильтров повышает себестоимость добываемой воды и снижает эффективность использования водоносного горизонта.

Из 49 скважин, оборудованных сетчатыми фильтрами, 41 полностью вышла из строя в среднем через 26 лет, в восьми требовался ремонт и их средний возраст составляет 43 года (табл. 2). Восемь действующих скважин, оборудованных сетчатыми фильтрами, имеют фактический удельный дебит 2–12 м<sup>3</sup>/(ч·м), что в среднем составляет 7 м<sup>3</sup>/(ч·м).

Проволочные фильтры действующих скважин состоят из перфорированной трубы диаметром 12–14 дюймов, с проходными отверстиями в количестве от 656 до 1000 с диаметром отверстий 16–22 мм, стальной нержавеющей проволоки диаметром 3 мм с шагом намотки 0,5–2 мм.

Из 154 скважин, оборудованных проволочными фильтрами, 86 полностью вышли из строя в среднем через 21 год, для 68 скважин требовался ремонт при их среднем возрасте 35 лет (табл. 2), и только одна скважина работает без ремонтов 32 года.

Проволочные с гравийной обсыпкой фильтры в настоящее время получили более широкое распространение, поскольку имеют простую

конструкцию, минимальные гидравлические сопротивления и высокую коррозионную стойкость. Благодаря хорошей прочности эти фильтры весьма устойчивы при восстановлении дебита скважин с помощью кислотных обработок, а также электрогидравлического удара [3].

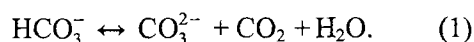
Из 213 скважин, оборудованных проволочными фильтрами с гравийной обсыпкой, 23 полностью вышли из строя в среднем через 19 лет, для 148 скважин требовался ремонт через 22 года (табл. 2), а 42 скважины работают без ремонтов 13 лет.

Каркасно-стержневые фильтры по сравнению с проволочными и сетчатыми имеют большую скважность, поэтому первоначальный удельный дебит ликвидированных скважин с такими фильтрами составляет 13 м<sup>3</sup>/(ч·м), а у действующих после ремонта изменяется от 14 до 16 м<sup>3</sup>/(ч·м) (табл. 2).

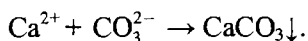
Способ сбора материалов вносит в полученные результаты определенный субъективизм, поскольку достоверная информация дается преимущественно по действующим скважинам. Наиболее объективной оценкой следует считать показатель средней долговечности действующих скважин, а также причины их выхода из строя.

Химический состав подземных вод также влияет на долговечность скважин. В результате нарушения химического равновесия в прифильтровой зоне за счет понижения давления происходит десорбция свободной углекислоты из подземных вод. При этом интенсифицируется гидролиз бикарбоната железа, в результате чего Fe<sup>2+</sup> окисляется до Fe<sup>3+</sup> с образованием гидроксида трехвалентного железа Fe(OH)<sub>3</sub>, основного коагулирующего соединения [3].

Кроме так называемой «свободной» углекислоты, находящейся в виде растворенного в воде газа CO<sub>2</sub> и недиссоциированных молекул H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, содержится «полусвязанная» углекислота в виде бикарбонатных ионов HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, а в некоторых случаях и «связанная» углекислота в виде карбонатных ионов CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. В подземных водах существует динамическое равновесие между различными формами угольной кислоты



Из (1) следует, что для поддержания в растворе определенной концентрации бикарбонатных ионов  $\text{HCO}_3^-$  требуется, чтобы в воде присутствовало соответствующее этой концентрации количество свободной углекислоты  $\text{CO}_2$ , называемой равновесной углекислотой [4]. Если количество свободной углекислоты больше равновесной концентрации, то избыток способен вызывать растворение карбоната кальция. При недостатке  $\text{CO}_2$  будет существовать тенденция к распаду части бикарбонатных ионов, т. е. к сдвигу вправо равновесия (1). Это приведет к дополнительному образованию  $\text{CO}_3^{2-}$ , которые будут реагировать с присутствующими в подземных водах катионами кальция, с выделением из раствора осадка карбоната кальция в соответствии с уравнением



Склонность воды выделять осадок карбоната кальция или растворять его определяется индексом насыщения, предложенным Ланжелье в 1936 г. Индекс насыщения равен разнице между замеренной (фактической) и расчетной (равновесной) для данной гидрохимической системы величинами  $\text{pH}$ :  $J = \text{pH} - \text{pH}_s$  [4].

Для расчета  $\text{pH}_s$  И. Э. Апельцин предложил номограмму [4], в которой  $\text{pH}_s$  определяется как функция температуры  $f_1(t)$ , содержания кальция  $f_2(\text{Ca}^{2+})$ , величины щелочности  $f_3(\text{щ})$  и общего солесодержания  $f_4(\text{р})$ :  $\text{pH}_s = f_1(t) + f_2(\text{Ca}^{2+}) + f_3(\text{щ}) + f_4(\text{р})$ . При определении величины  $\text{pH}_s$  общее солесодержание «р» принимается равным величине сухого остатка, определенного химическим анализом.

Если  $\text{pH} > \text{pH}_s$ , то вода склонна к выделению карбоната кальция, а при  $\text{pH} < \text{pH}_s$  вода способна растворять карбонат кальция.

Индекс Ланжелье не является объективным показателем стабильности воды, так как различные растворы, характеризующиеся одинаковым индексом Ланжелье, могут значительно отличаться по величине кислотности (щелочности). Более объективную оценку условий стабильности раствора дал в 1944 г. Ризнер. Индекс стабильности по Ризнеру определяется по формуле:  $\text{Ri} = 2\text{pH}_s - \text{pH}$ . Установлено, что при

$\text{Ri} < 7,0$  воды всегда склонны к выделению кольматирующих образований [3].

Состав подземных вод исследовался по данным химических анализов, выполняемых в УП «Минскводоканал», 317 скважин 11 водозаборов г. Минска. Химический состав подземных вод – гидрокарбонатный кальциево-магниевый, минерализация изменяется от 104 до 749 мг/л.

Наиболее вероятные значения параметров химического анализа, полученные статистическим методом, а также значения показателей  $J$  и  $\text{Ri}$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения параметров химического анализа воды

Параметры химического анализа воды	Количество наблюдений	Среднее арифметическое	Доверительный интервал -95 %	Доверительный интервал +95 %	Минимум	Максимум
Fe общ., мг/л	317	0,6098	0,5088	0,7108	0,05	9,95
pH	317	7,7192	7,6943	7,7442	7,15	8,4
Общая минерализация, мг/л	317	263,571	253,6979	273,444	104	749
Сульфаты, мг/л	317	13,8592	12,4362	15,2822	0,11	98
Ca, мг/л	317	55,6621	53,7794	57,5447	8	112,2
Cl, мг/л	317	13,8725	11,5071	16,2379	1,6	211,9
Окисляемость, мг $\text{O}_2$ /л	317	1,1729	1,0686	1,2772	0,3	8,4
Показатель Ризнера $\text{Ri}$	317	8,0532	8,0229	8,0834	7,12	8,76
Индекс Ланжелье $J$	317	-0,1614	-0,1769	-0,1458	-0,65	0,39

Индекс насыщения  $J$  в изучаемой воде находится в пределах  $(-0,65) - (+0,39)$ , показатель  $\text{Ri}$  колеблется от 7,12 до 8,76 (табл. 3). При таких значениях индекса насыщения и показателя Ризнера воды способны кольтмировать фильтры и прифильтровые зоны скважин главным образом соединениями железа и в меньшей степени солями жесткости. Это подтверждается исследованиями состава кольтмирующих отложений [5].

Значение  $\text{pH}$  исследуемой воды находится в пределах 7,15–8,4. В соответствии с классификацией В. В. Иванова и Г. А. Невраева воды являются слабощелочными, так как  $\text{pH}$  находится в пределах  $7,2 < \text{pH} < 8,5$ . При таких значениях  $\text{pH}$  закисное железо мигрирует в ионной форме. Поэтому кольтмаж фильтров и прифильтровых зон гидроакисью железа маловероятен. Но трехвалентное железо будет в форме

коллоида или преимущественно даже в виде суспензии, поскольку коагуляция коллоидальной гидроокиси железа в зависимости от солевого состава воды происходит при  $\text{pH} = 6-7$ . Процесс коагуляции фильтров соединениями железа будет идти только в окислительной обстановке при наличии в воде кислорода, необходимого для перевода иона железа в трехвалентную форму. Аэрация подземных вод наиболее интенсивно происходит в непосредственной близости от скважины. В отдельных случаях окисление закисного железа происходит за счет кислорода, содержащегося в незначительных концентрациях в воде, при турбулизации потока в гравийной обсыпке и фильтре. Кроме того, насыщенные кислородом безнапорные грунтовые воды могут проникать в напорный пласт через так называемые «гидрогеологические окна» [3].

Содержание сульфатов в подземных водах изменяется в пределах 0,11–98 мг/л. Это указывает на то, что вода по отношению к сульфатам является слабоагрессивной (<300 мг/л). Содержание в воде сульфатов предполагает выделение осадка на фильтрах в виде малорастворимого сульфата кальция  $\text{CaSO}_4$ , а также при наличии сульфатредуцирующих бактерий еще и образование сульфидов железа.

Процессы химического коагулятажа, происходящие в прифильтровых зонах скважин, интенсифицируются деятельностью железо-, марганцево- и сульфатредуцирующих бактерий. Для развития этих бактерий необходимо, чтобы величина  $\text{pH}$  находилась в пределах 5,4–7,2, содержание железа  $\text{Fe}^{2+}$  – в пределах 1,6–12,0 мг/л. Подземная вода должна содержать углекислоту [3]. Таким образом, условия для обитания и развития бактерий в скважинах водозаборов г. Минска являются вполне приемлемыми.

Растворенные в воде хлориды – ускорители коррозии вследствие разрушающего действия

хлор иона  $\text{Cl}^-$  на защитные пленки. Содержание хлоридов составляет 1,6–211,9 мг/л (табл. 3). По отношению к хлоридам вода считается среднеагрессивной.

Низкая окисляемость (0,3–8,4 мг  $\text{O}_2/\text{л}$ ) свидетельствует о том, что в воде содержится небольшое количество органических веществ.

## ВЫВОДЫ

1. Основными причинами снижения долговечности скважин являются химический коагулятаж и пескование скважин.

2. Эффективный способ борьбы с химическим коагулятажем – сооружение скважин с высокими первоначальными удельными дебитами.

3. Основными средствами борьбы с пескованием скважин являются гравийная обсыпка фильтров соответствующих толщины и гранулометрического состава, а также соблюдение режима эксплуатации скважин.

4. Основным коагулирующим соединением фильтров и прифильтровых зон являются гидроксид трехвалентного железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  и другие железосодержащие соединения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Станкевич Р. А. Минское месторождение глубоких артезианских вод: Краткий очерк природных условий и истории освоения. – Мн.: Беларуская навука, 1997. – 87 с.
2. Квашиин Г. П., Деревянных А. И. Водозаборные скважины с гравийными фильтрами. – М.: Недра, 1981. – 216 с.
3. Гаврилко В. М., Алексеев В. С. Фильтры буровых скважин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1976. – 345 с.
4. Апельцин И. Э. Подготовка воды для затопления нефтяных пластов. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 299 с.
5. Ивашечкин В. В., Кондратович А. Н., Макарова Э. А. Исследование отложений в фильтрах водозаборных скважин и тестирование реагентов для их удаления // Мир технологий. – 2004. – № 1. – С. 81–88.