ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПРИ ЕЕ СЕЛЕКТИВНОМ ЗАБОРЕ ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩ

© 2017 г. А.П. Лепихин^{1,2}, Т.П. Любимова³, А.А. Возняк²,
Я.Н. Паршакова³, А.В. Богомолов¹, Ю.С. Ляхин¹

¹ ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия

² ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, г. Пермь, Россия

³ ФГБУН «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия

Ключевые слова: селективный забор воды, водохранилище, вычислительный эксперимент, питьевое водоснабжение, Чусовской водозабор, качество воды.

А.П. Лепихин

Т.П. Любимова

А.А. Возняк

Я.Н. Паршакова

Ю.С. Ляхин

А.В. Богомолов

Рассмотрены вопросы повышения эффективности использования селективного отбора воды для решения задач питьевого водоснабжения на примере Чусовского водозабора г. Перми. При наличии устойчивой вертикальной стратификации водных масс существенный интерес представляет отбор воды с лучшими потребительскими свойствами. Если вода с требуемыми свойствами располагается в верхних горизонтах, то наи-

более эффективным инструментом является создание донных барьеров вокруг водозаборных оголовков, отсекающих забор воды из придонных горизонтов. При этом параметры барьера определяются как расходом забираемой воды, так и

высотой расположения «слоя скачка», определяющего границу раздела водных масс. Параметры барьера должны соответствовать действующим Правилам эксплуатации водохранилищ.

Для отработки технологии обеспечения устойчивого забора воды с требуемыми потребительскими свойствами выполнены натурные и вычислительные эксперименты. Серия вычислительных экспериментов по влиянию расходов заборов воды на качество отбираемой воды через отдельный водозаборный оголовок проводилась в 3D при помощи пакета вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent. Задача решалась в рамках нестационарного изотермического подхода. Получены выводы как по улучшению качества забираемой воды при значимой неоднородности химических, физических свойств по глубине водных объектов, так и по обеспечению эффективной и устойчивой работы селективного отбора воды.

В крупных водных объектах часто наблюдается существенная устойчивая неоднородность распределения по глубине гидрохимических и гидрофизических свойств воды. При наличии городского водозабора данная неоднородность может использоваться для выбора слоя с лучшими потребительскими свойствами отбираемой воды [1, 2]. Для решения этих задач организуются селективные водозаборы, позволяющие проводить выборочный, селективный отбор воды с требуемыми свойствами. Важнейшим фактором, принципиально затрудняющим реализацию и использование селективных водозаборов, является значительная внутригодовая и междугодичная изменчивость гидрологического и гидрохимического режимов водных объектов. Наиболее эффективным способом «нейтрализации» данной изменчивости является обеспечение variability глубин забора воды. Однако организация таких водозаборов большой мощности является сложной и дорогостоящей задачей.

В случае, когда водные массы с требуемыми потребительскими свойствами располагаются в приповерхностном слое, простейшей конструкцией, позволяющей достаточно эффективно отсекаать отбор из нижних придонных горизонтов, является создание донных барьеров у оголовков водозаборов. Их размеры должны, с одной стороны, гарантировать эффективное отсечение забора вод из придонных горизонтов, с другой, – не препятствовать отбору воды при минимальных уровнях и максимальных толщинах льда или шуги на водохранилище.

Рассмотрим работу такого донного барьера на примере Чусовского водозабора г. Перми. Данный водозабор расположен в 8 км ниже слияния рек Чусовая и Сылтава в Чусовском заливе Камского водохранилища. Чусовая и Сылтава при слиянии практически равнозначны и по площади водосбора, и по водности. Поэтому качество воды Камского водохранилища в этом рай-

оне определяется гидрологическим и гидрохимическим режимом данных водотоков. Впервые возможность организации селективного отбора воды на Чусовском водозаборе рассмотрена в [1]. Особенности организации селективного отбора на данном водозаборе, исходя из анализа гидрологического и гидрохимического режимов Чусовского плеса Камского водохранилища, исследованы в работе [2].

Минерализация и плотность воды р. Сылвы вследствие особенностей почвенно-геологического строения ее бассейна (высокая закарстованность), как правило, значительно выше минерализации р. Чусовой (рис. 1). Данное существенное различие плотностей двух сливающихся водотоков в условиях, когда их устьевые участки расположены в зоне подпора от Камской ГЭС, приводит к весьма специфическому гидрохимическому режиму Чусовского плеса. Более минерализованные и более плотные воды р. Сылвы «подтекают» под менее плотные воды Чусовой, в свою очередь воды р. Чусовой «надтекают» на воды Сылвы. Гидрологические, гидрохимические, гидродинамические аспекты слияния этих водотоков обсуждены в [3]. Соответственно, ниже слияния Сылвы и Чусовой, в т. ч. и в районе размещения Чусовского водозабора г. Перми, наблюдается достаточно устойчивая двухслойная структура водной массы, когда в верхних горизонтах вода по своим свойствам близка к воде р. Чусовой, а в нижних – к воде р. Сылвы. При этом весьма отчетливо выражена граница между этими водными массами. В дальнейшем изложении данная граница будет обозначаться как «слой скачка».

Основным лимитирующим гидрохимическим показателем качества воды на Чусовском водозаборе является жесткость воды, тесно связанная с минерализацией (рис. 2). Для обеспечения требуемого качества воды ее следует отбирать из верхних, менее минерализованных слоев [1, 2]. В качестве наиболее простой и эффективной схемы обеспечения селективного отбора воды из верхних горизонтов было рекомендовано создание вокруг водозаборных оголовков донных барьеров, способных отсекал забор воды из нижних горизонтов.

Для обеспечения устойчивого отбора воды с требуемыми потребительскими свойствами высота барьера должна быть гарантировано выше расположения «слоя скачка», т. к. он может колебаться. Даже при относительно небольшом превышении расположения «слоя скачка» над высотой барьера при вертикальной скорости забора воды ниже критической возникает запирающий слой, практически полностью «блокирующий» забор воды из верхних, менее минерализованных слоев. Данное обстоятельство весьма существенно, т. к. в последние годы из-за усиления систем контроля, перехода на менее водоемкие технологии наблюдается существенное снижение водопотребления.

К сожалению, высота барьера определяется не только высотой расположения «слоя скачка». Как и все гидротехнические сооружения на водохранилище она должна соответствовать Правилам эксплуатации водохранилищ [4]. Так, согласно действующим Правилам эксплуатации Камского водохранилища [4], максимальная сработка водохранилища (УМО) допустима до 100 м БС. В этом случае, при толщине льда около 1 м, верхняя

отметка донного барьера, отсекающего поступление к оголовкам водозабора воды из нижних, более плотных и более минерализованных слоев, не может быть выше 97,5–98,0 м БС. Соответственно, данная отметка верха барьера была принята для проектных решений [2].

При этом, как следует из анализа уровня режима Камского водохранилища, снижение уровня воды до УМО наблюдается весьма редко, с вероятностью менее 1 %. Так, за период наблюдений с 2008 по 2015 гг. уровень воды в Камском водохранилище ни разу не опускался ниже 101 м БС. Поэтому, в принципе, высота донного барьера может быть поднята на 1 м выше, до 98,5–99,0 м БС. Однако это решение требует радикального изменения такого базового положения как УМО. В связи с тем, что Правила эксплуатации водохранилищ разрабатываются, в первую очередь, исходя из интересов гидроэнергетики, это направление для повышения устойчивости данной системы питьевого водоснабжения, к сожалению, малоперспективно. Более перспективным представляется исследование факторов формирования «слоя скачка», механизмов преодоления запирающих слоев.

Как показывают многочисленные натурные исследования, выполненные на Чусовском плесе Камского водохранилища, «слой скачка», как правило, располагается на отметках 97,0–99,0 м (рис. 3), причем наиболее часто (в 55 % случаев) на 98,0 м БС [1–3].

Учитывая, что гидрологический и гидрохимический режимы водохранилища определяются его уровнем и режимом притоков [5], было бы естественно предположить, что расположение «слоя скачка» обусловлено как гидрологическим и гидрохимическим режимами рек Сытва и Чусовая, так и режимом регулирования Камской ГЭС. Кроме того, т. к. данные водотоки имеют достаточно близкую водность, высота этой придонной области должна была находиться на половине глубины потока. Однако таких однозначных закономерностей не выявлено (рис. 3).

Высота расположения «слоя скачка» за период инструментальных наблюдений варьировала, как уже отмечалось, на отметках 97,0–99,0 м БС (см. рис. 3) [1–3], независимо от уровня воды в водохранилище. Инвариантность расположения наблюдаемого «слоя скачка» относительно уровня режима Камского водохранилища, а также относительно соотношения расходов воды р. Сытвы у пос. Сытвенск и р. Чусовая у пгт Лямино демонстрируется на рис. 4. Рисунки 3 и 4 убедительно свидетельствуют, если причиной возникновения «слоя скачка» является плотностная гидродинамическая устойчивость, для ее оценки разработаны достаточно эффективные методы [2, 3], а оценка уровня расположения рассматриваемого «слоя скачка» является значительно более сложной задачей. При этом сам «слой скачка» представляет весьма динамическую структуру, на поверхности которой наблюдаются волновые колебания с периодом несколько минут.

Таким образом, расположение «слоя скачка» в настоящее время является неуправляемым параметром, а наиболее простой способ обеспечения необходимой устойчивости селективного забора воды путем увеличения отметок УМО и повышения высоты барьеров встречает очень серьезные трудности. Поэтому было принято решение парировать увеличение высоты «слоя скачка» путем изменения мощности забора, т. е. увеличивать вертикальные составляющие скоростей течений над донным барьером путем изменения мощности работы насосов. Необходимо, чтобы мощность водозаборных насосов задавала такие вертикальные скорости течений, при которых происходил бы «прорыв» запирающего слоя над донным барьером.

Рис. 4. Расположение средней высоты «слоя скачка» при разных уровнях воды Камского водохранилища с учетом отношения расходов воды в р. Чусовой (пгт Лямино) и р. Сылве (пос. Сылвенск).

Выполнена серия вычислительных экспериментов по влиянию расходов заборов воды на качество отбираемой воды через отдельный водозаборный оголовок. Вычислительные эксперименты проводились в 3D при помощи пакета вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent с использованием $k-\epsilon$ модели для описания турбулентных пульсаций. Задача решалась в рамках нестационарного изотермического подхода. Течение рассматривали как изотермическое, плотность считали зависящей от минерализации воды. Расчеты проводили с использованием суперкомпьютера Института математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук (ИММ УрО РАН).

Ситуация вне стакана (барьеров) в данных расчетах не рассматривалась, поэтому размеры расчетной области вне стакана определяли только, исходя из условия обеспечения корректности расчетов качества забираемой воды, внутри стакана.

Результаты расчетов представлены на рис. 5–7.

Рис. 5–7 прекрасно иллюстрируют присутствие и отсутствие запирающего слоя. Необходимо отметить, что рассматриваемый в работе запирающий слой ни в коем случае не «блокирует» поступление воды в оголовки водозабора как такового, а препятствует, при его расположении выше донного барьера, забору воды с более низкой жесткостью и меньшей плотностью, характерной для р. Чусовой. Запирающий слой («слой скачка») возникает, когда интенсивность вертикального турбулентного перемешивания не может преодолеть силы Архимеда, обусловленной вертикальной плотност-

ной неоднородностью. Для преодоления «жидкой» преграды, образуемой «слоем скачка», необходимо создать такую вертикальную скорость потока, которая бы разрушала этот слой и обеспечивала поступление воды с меньшей плотностью и меньшей жесткостью в оголовки водозабора.

Как следует из сопоставления рис. 5–7, при увеличении расхода забираемой воды с $1,0$ до $2,53 \text{ м}^3/\text{с}$ и, тем более, до $4,86 \text{ м}^3/\text{с}$ происходит существенная перестройка поля скоростей течений в районе водозаборных оголовков, в результате которой идет формирование забора воды из более поверхностных, менее минерализованных слоев, характеризующихся меньшей жесткостью.

Полученные в ходе вычислительных экспериментов результаты были использованы при отработке режимов заборов воды через отдельные оголовки насосной станции 3 очереди Чусовских очистных сооружений (ЧОС). Для оценки эффективности выработанных рекомендаций поставлен натурный эксперимент по параллельному забору воды через водозаборные оголовки 3 очереди (с донными барьерами) и через оголовки старой

конструкции (без донных барьеров). Результаты натурного эксперимента представлены в таблице. Как следует из таблицы, предложенные и реализованные на водозаборных оголовках 3 очереди ЧОС донные барьеры при корректном использовании существенно снижают жесткость забираемой воды, обеспечивая ее нормативное качество.

Таблица. Результаты натурного эксперимента по параллельному забору воды на новой (наличие донных барьеров) и старой (без донных барьеров) насосных станциях ЧОС (по данным оператора системы водоснабжения г. Перми ООО «Новогор-Прикамье»)

Дата отбора проб воды	Жесткость воды в ед. жесткости	
	Насосная станция 1 подъема (3 очередь)*	Насосная станция 1 подъема (1 очередь)
13.01.2017	6,8	12,6
14.01.2017	6,7	14,1
15.01.2017	6,3	13,5
16.01.2017	5,8	12,8
17.01.2017	6,5	14,3
18.01.2017	5,8	13,0
19.01.2017	5,9	13,2
20.01.2017	6,2	13,4
21.01.2017	7,6	13,0
22.01.2017	8	17,2
23.01.2017	6,5	12,9
24.01.2017	6,5	12,9
25.01.2017	6,0	13,1

Примечание: * – верх оголовка 3 очереди водозабора располагается на 0,6 м выше верха оголовка 1 очереди. Уровень воды снизился с 13.01 по 25.01 на 28 см.

ВЫВОДЫ

Селективный отбор позволяет существенно улучшить качество забираемой воды при значимой неоднородности химических, физических свойств воды по глубине водных объектов. Устойчивость селективного отбора воды определяется соотношением расположения «слоя скачка», свойств воды, слоя и мощности забора. Наиболее простой по реализации конструкцией селективного водозабора является создание донного барьера (стакана) вокруг оголовка водозабора. При этом высота барьера должна быть сопоставима с расположением «слоя скачка».

На Чусовском плесе Камского водохранилища, вследствие слияния рек Сылвы и Чусовой, находящихся в подпоре от Камской ГЭС и характеризующихся различной минерализацией, наблюдается существенное вертикальное расслоение водных масс. В приповерхностных слоях качество воды близко к качеству воды р. Чусовой, в придонных – Сылвы. Данная вертикальная неоднородность водных масс используется для снижения жесткости забираемой воды. Для отсечения отбора более минерализованных и более плотных вод р. Сылвы были предложены и реализованы донные барьеры вокруг оголовков 3 очереди Чусовского водозабора г. Перми.

Высота донных барьеров вынуждена определяться не только отметкой расположения «слоя скачка», но и подчиняться Правилам эксплуатации Камского водохранилища, в частности – уровню мертвого объема (УМО) – 100 м БС. С учетом характерной толщины льда около 1 м, верхняя отметка барьера не может быть выше 98,0 м БС. Многочисленные натурные наблюдения показали, что отметка «слоя скачка» варьирует в диапазоне 97,0–99,0 м БС. При расположении «слоя скачка» выше донного барьера, при скоростях забора ниже критических может формироваться «запирающий» слой, блокирующий поступление воды из верхних, менее плотных слоев. Для отработки технологии забора воды требуемого качества выполнены серии вычислительных экспериментов, позволившие выработать соответствующие рекомендации. Проведенные натурные эксперименты показали высокую эффективность работы донных барьеров.

Учитывая значимость Чусовского плеса Камского водохранилища для обеспечения устойчивого питьевого водоснабжения г. Перми, представляется весьма актуальным продолжение исследований формирования плотностного расслоения водных масс, особенностей динамики границ их раздела на данной акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лепихин А.П., Немковский Б.Б., Онянов В.А., Капитанова Е.Н. Селективный отбор воды // Водоснабжение и санитарная техника. 1988. № 3. С. 27–28.
2. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Коновалов В.В., Паршакова Я.Н., Возняк А.А., Шумилова Н.С. Использование стратификационных эффектов для улучшения качества воды, забираемой из поверхностных водных объектов на питьевые нужды // Водное хозяйство России. 2011. № 5. С. 89–104.
3. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Y., Konovalov V., Tiunov A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers// J. of Hydrology. 508 (2014). P. 328–342.
4. Правила эксплуатации Камского водохранилища. Режим доступа: http://kambvu.ru/files/news/18.01.2017/pivr_kamskogo_i_votkinskogo_2016.pdf.
5. Матарзин Ю.М. Гидрология водохранилищ. Пермь: ПГУ, 2003. 296 с.

Сведения об авторах:

Лепихин Анатолий Павлович, д-р геогр. наук, профессор, директор, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал (КамНИИВХ), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Островского, 113; заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» (ГИ УрО РАН), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская 78А; e-mail: lepin49@mail.ru

Любимова Татьяна Петровна, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией вычислительной гидродинамики, ФГБУН «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» (ИМСС УрО РАН), Россия, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: lubimova@psu.ru.

Возняк Анна Анатольевна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал (КамНИИВХ), 614007, г. Пермь, ул. Островского, 113; e-mail: AAVoznyak@gmail.com

Паршакова Яна Николаевна, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, ФГБУН «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» (ИМСС УрО РАН), Россия, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: parshakova@icmm.ru

Богомолов Андрей Владимирович, младший научный сотрудник, лаборатория проблем гидрологии суши, ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: whitewing85@mail.ru

Ляхин Юрий Сергеевич, инженер, лаборатория проблем гидрологии суши, ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: ljahin85@mail.ru