

УДК 628.113.8

*** ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРАТИФИКАЦИОННЫХ
ЭФФЕКТОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ,
ЗАБИРАЕМОЙ ИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ
ОБЪЕКТОВ НА ПИТЬЕВЫЕ НУЖДЫ**

© 2011 г. А.П. Лепихин^{1,2}, Т.П. Любимова³, В.В. Коновалов³,
Я.Н. Паршакова³, А.А. Возняк², Н.С. Шумилова³

¹ Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

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

³ Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

Ключевые слова: водные объекты, водоснабжение, селективный водозабор, донные барьеры, моделирование.

На примере Чусовского водозабора (ЧОС) г. Перми рассмотрены особенности организации селективного отбора воды из водных объектов в условиях существенной вертикальной неоднородности содержания лимитирующих загрязняющих ингредиентов. Вертикальная стратификация водотока обусловлена слиянием в непосредственной близости от водозабора двух рек Чусовой и Сылвы с существенно различающимся гидрохимическим режимом. Для оценки эффективности использования донных барьеров при организации селективного отбора воды выполнены имитационные вычислительные эксперименты в трехмерной постановке с использованием программного продукта ANSYS Fluent.

Введение

Качество воды в достаточно глубоких водных объектах с замедленным водообменом существенно различается не только по акватории, но и по глубине. С целью повышения потребительских свойств воды, поступающей в систему питьевого водоснабжения, снижения затрат на водоподготовку, необходимо отбирать воду с наиболее оптимальными характеристиками, т. е. организовать селективный — избирательный забор воды. Такой отбор довольно просто осуществляется, если содержа-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Пермского края (грант 10-05-96068-р_урал_a).

ние контролирующих показателей достаточно «жестко» связано с плотностью воды. Плотность воды определяется, как известно, температурой и минерализацией, а также содержанием взвешенных наносов. Как правило, селективные водозаборы широко используются в теплоэнергетике, когда плотностные стратификации создаются неоднородностью температуры воды.

При организации селективного отбора для целей питьевого водоснабжения наиболее существенный интерес представляют стратификационные эффекты, обусловленные в первую очередь неравномерностью распределения минерализации и связанных с ней показателей химического состава воды источников водоснабжения.

В 1983 г. в рамках работ по исследованию качества воды в районе Чусовского водозабора г. Перми в связи с проектированием второй очереди Чусовских очистных сооружений (ЧОС-2) [1] была обнаружена устойчивая существенная плотностная стратификация воды, обусловленная существенными различиями гидрохимических режимов рек Чусовая и Сылва, сливающихся выше рассматриваемого водозабора (рис. 1).



Проведенные исследования дали основание для снижения минерализации забираемых вод и, соответственно, очень тесно связанной с ней жесткости воды, путем организации селективного водозабора [1, 2]. При этом, исходя из особенностей гидрологического и гидрохимического режимов источника водоснабжения, характерного размещения и мощности водозабора, для организации селективного отбора воды были предложены схемы так называемого донного барьера, создаваемого вокруг водозаборных оголовков [1, 2].

К сожалению, в 1990 г. реализация проекта второй очереди Чусовского водозабора была приостановлена. В настоящее время принято решение о его реализации. В связи с этим существенный интерес представляет оценка эффективности донных барьеров, предложенных проектировщиками для снижения жесткости воды в 1983 г.

В первую очередь необходимо рассмотреть особенности гидрологического и гидрохимического режимов рек Сылвы и Чусовой.

Особенности гидрологического и гидрохимического режимов рассматриваемого участка водохранилища

Рассматриваемые реки имеют близкие водосборные площади: р. Чусовая $\sim 23,0 \cdot 10^3$ км², р. Сылва $\sim 19,7 \cdot 10^3$ км². Расходы весеннего паводка и летней межени на р. Чусовой значительно больше, чем на р. Сылве, в то же время расходы зимней межени, в силу особенностей водосборной территории р. Сылвы, больше, чем расходы р. Чусовой (рис. 2). Характерной особенностью рек с глубокой зимней меженью, какими являются реки Сылва и Чусовая, является значительно меньшая изменчивость расходов зимней межени по сравнению со стоком весеннего половодья. Данное обстоятельство имеет существенное значение для организации селективного водозабора, т. к. значительно снижает область возможных значений параметров, определяющих масштабы и устойчивость плотностной стратификации.

В силу географических особенностей химический состав данных рек существенно различается. При этом различия охватывают не только общую минерализацию, но и соотношение отдельных ингредиентов. С позиции обеспечения нормативного качества забираемой воды на данном водозаборе принципиальное значение имеет динамика общей жесткости воды рассматриваемых водотоков, ее зависимость от их расходов воды (рис. 3) и минерализации (рис. 4). Как следует из рис. 3, данные различия особенно существенны в области малых расходов, характерных для лимитирующего периода зимней межени.

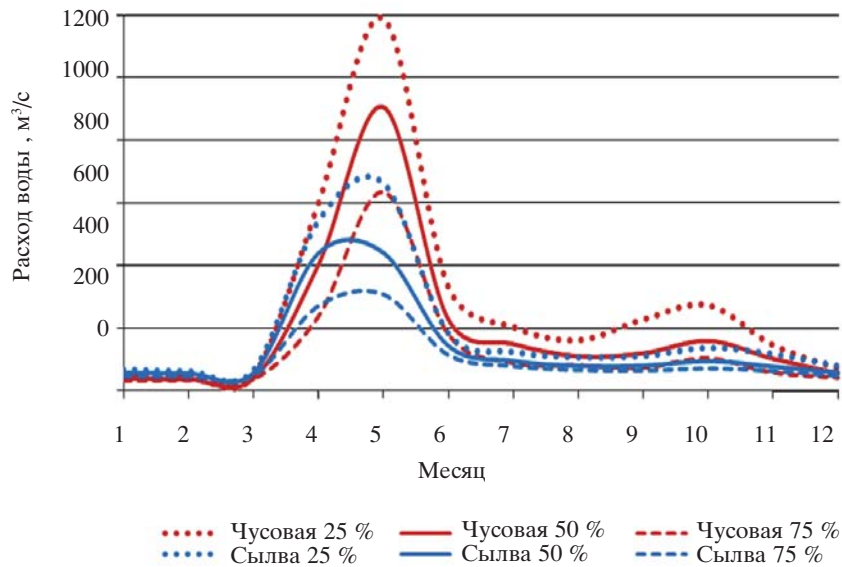


Рис. 2. Динамика среднемесячных расходов воды рек Сылвы у с. Подкаменное и Чусовой у пгт Лямино.

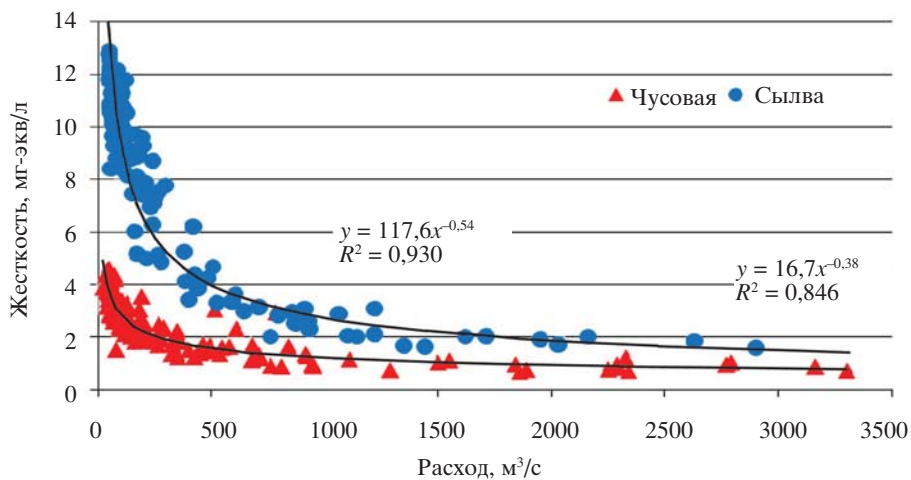


Рис. 3. Зависимости общей жесткости воды рек Сылвы и Чусовой от расхода.

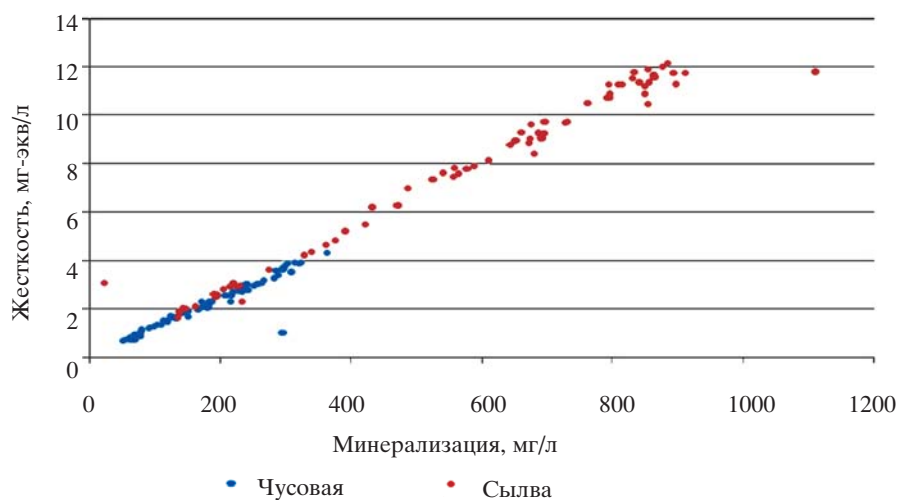


Рис. 4. Зависимости общей жесткости воды рек Чусовой и Сылвы от минерализации.

Зависимости общей жесткости воды от минерализации для обеих рек имеют качественное и количественное сходство и описываются одним линейным уравнением (см. рис. 4).

Из-за существенного различия минерализации и, соответственно, жесткости воды данных рек формируется значительная вертикальная неоднородность (рис. 5).

Необходимо отметить, что при детальном анализе вертикальной структуры качества воды удобно использовать оперативно измеряемый показатель удельной электропроводности воды. При этом между удельной электропроводностью χ (мксим/см) и минерализацией S (г/л) имеет место тесная корреляционная связь:

$$S = 0,71\chi - 3,6 \quad (R^2 \sim 0,96).$$

Такая же очень жесткая корреляционная связь имеет место между содержанием общей жесткости воды и удельной электропроводностью. Как следует из рис. 5, удельная электропроводность, а, соответственно, минерализация и общая жесткость воды в придонном слое значительно повышаются. Такая ситуация обусловлена «подтеканием» более плотных вод р. Сылвы под менее плотные воды р. Чусовой, соответственно, воды р. Чусовой «натекают» на воды р. Сылвы.

Как уже отмечалось, наиболее эффективным приемом, позволяющим в значительной мере «отсекать» забор более минерализованных

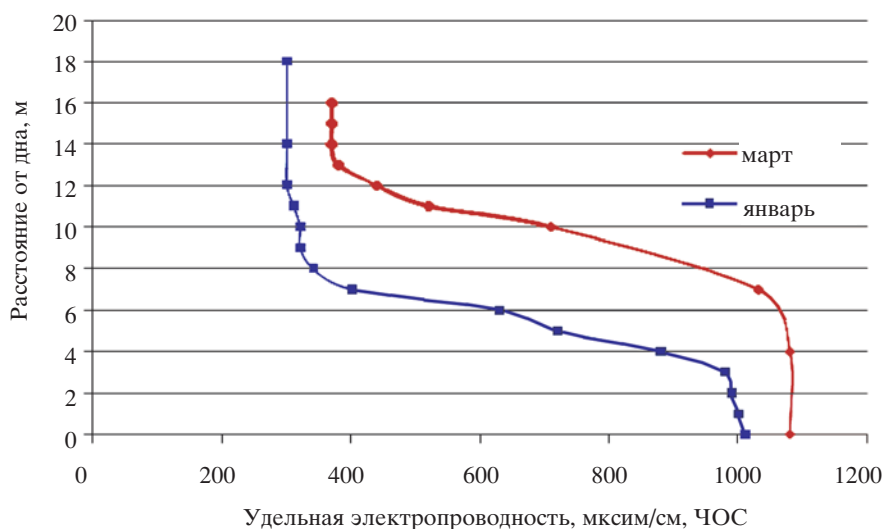


Рис. 5. Изменение удельной электропроводности по глубине в районе Чусовского водозабора (уровень воды КамГЭС в январе 2011 г. — 105,2 м, в марте 2011 г. — 102,7 м).

вод из придонных областей, является создание так называемых донных барьеров [3]. Важнейшее требование к донным барьерам — они должны предотвращать забор низкокачественной воды из нижних более плотных слоев, характеризующихся повышенной жесткостью. Эффективность донного барьера, как инструмента селективного забора воды, определяется, в первую очередь, высотой слоя плотностного скачка относительно расположенных оголовков водозабора и высотой донного барьера. Донный барьер будет характеризоваться весьма низкой эффективностью, если слой скачка располагается ниже уровня размещения водозаборных оголовков или, наоборот, выше барьера.

Как показывают проведенные исследования, относительная высота расположения слоя плотностного скачка, отделяющего более минерализованные воды р. Сылвы от менее минерализованных вод р. Чусовой, определяется соотношением:

$$\frac{h_b}{H} \sim \frac{Q_5}{Q_5 + Q_{ch}}$$

где h_b — толщина нижнего слоя воды, характеризующегося повышенной минерализацией, м;

H — текущая глубина, м;

Q_s, Q_{ch} — текущие расходы рек Сылвы и Чусовой, соответственно, $\text{м}^3/\text{с}$.

На рассматриваемом объекте, как показывают материалы натуральных наблюдений (см. рис. 5), высота слоя скачка сопоставима (или выше) с высотой размещения оголовков водозабора, поэтому донный барьер может быть весьма эффективным инструментом, обеспечивающим селективный отбор воды из водного объекта требуемого качества.

Оптимальные размеры донного барьера определяются, исходя из условия обеспечения качества забираемой воды из верхних горизонтов при минимальных затратах на его создание.

В практике инженерных расчетов оценка параметров водозаборных оголовков, обеспечивающих селективный отбор воды, как правило, основывается на анализе критических скоростей течения, возникающих при заборе воды в условиях наблюдаемой плотностной стратификации и требуемой мощности водозабора. Нетрудно видеть, что максимальные скорости при заборе воды составляют $V \sim q/F$, где q — расход забираемой воды, $\text{м}^3/\text{с}$; F — суммарная площадь водозаборных окон рассматриваемого оголовка, м^2 .

Для достижения селективного отбора воды необходимо, чтобы скорость течения не превышала критического значения V_c . В инженерной практике V_c рассчитывается, как правило, на основе гидродинамических критериев подобия — числа Ричардсона, плотностного числа Фруда [3, 4] и др.

Число Ричардсона $Ri = g \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right) / \left[\rho \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right]$ характеризуется отно-

шением работы против сил плавучести к энергии турбулентности, а его «слоевой» аналог [5, 6]

$$Ri_e \approx gH(\Delta\rho/\rho)V^2.$$

Число Ричардсона определяет интенсивность вертикального турбулентного перемешивания в зависимости от степени плотностной стратификации. Согласно [5, 7]

$$K_{zz} \approx K_{zz0}(1 - \beta Ri)^{1/4},$$

где K_{zz} — коэффициент вертикального турбулентного обмена в стратифицированной среде, $\text{м}^2/\text{с}$;

K_{zz0} — соответствующий коэффициент для нестратифицированного потока;

β — некоторый параметр.

По оценкам [5, 7], $\beta = 1$. При таком β число $Ri \rightarrow 1$, происходит «запирание» нижнего слоя с более плотной водой вследствие затухания вертикального обмена. Отсюда наиболее простой критерий наличия устойчивой стратификации $Ri > Ri_c$, (где Ri_c — критическое число Ричардсона). По различным оценкам, Ri_c меняется в достаточно широком интервале. Так, по данным натурных измерений в устьевых участках рек, впадающих в моря $Ri_c \approx 20$ [6]. Поэтому, наряду с числом Ричардсона, в инженерной практике широко используется плотностное число Фруда

$Fr_p = V / \sqrt{((\Delta\rho/\rho)gH)}$, характеризующееся отношением кинетической

энергии потока к работе сил плавучести. При этом нетрудно видеть, что $Ri_c \approx Fr_p^{-2}$. Использование данных критериев применительно к модели идеальной жидкости и линейной аппроксимации распределения плотности по глубине потока позволило получить в [8] следующую оценку для критического значения числа Фруда: $Fr_{pc} \leq 0,318$. Проверка оценки Fr_{pc} на основе обработки достаточно большого объема экспериментальных данных, выполненная в работе [9], дала несколько более низкие значения критериев числа Фруда: $Fr_{pc} > 0,28$. В работе [10] на основе анализа экспериментальных данных предложен критерий, который учитывает не только силы «плавучести», но и силы вязкости:

$$\theta \approx (Fr_p^2 \cdot Re)^{-1/3},$$

где Re — число Рейнольдса, $Re = (V \cdot H)/\nu$;

ν — кинематическая вязкость воды.

Учитывая, что $Ri \approx Fr_p^{-2}$, имеем $\theta \approx (Ri/Re)^{1/3}$ или $\theta \approx (\nu g)^{1/3} (\Delta\rho/\rho)^{1/3} V$, при этом $\theta_c > 0,18$.

Если влияние дна и свободной поверхности мало, то в качестве определяющего критерия используется показатель $C = \theta^{-3}$. При этом данный критерий определяет характер поверхности раздела между слоями [10].

Размытая граница наблюдается при $C = 1650$, а отчетливая при $C \leq 150$. Размытость границы не означает отсутствие стратификации [3, 4]. В этом отношении существенный интерес представляет критерий, предложенный К.Я. Киндом [11]:

$$Fr_p^2 (\Delta\rho/\rho)^{-0,7} \leq 0,12.$$

Согласно экспериментальным исследованиям [12], толщина слоя вовлечения в движение при селективном ее отборе определяется соотношением $\delta = (q/N)^{1/3}$, где $N \approx \left(\frac{g}{\rho} \left(\frac{\partial\rho}{\partial z} \right) \right)^{1/2}$ — частота Брента—Вяйселя.

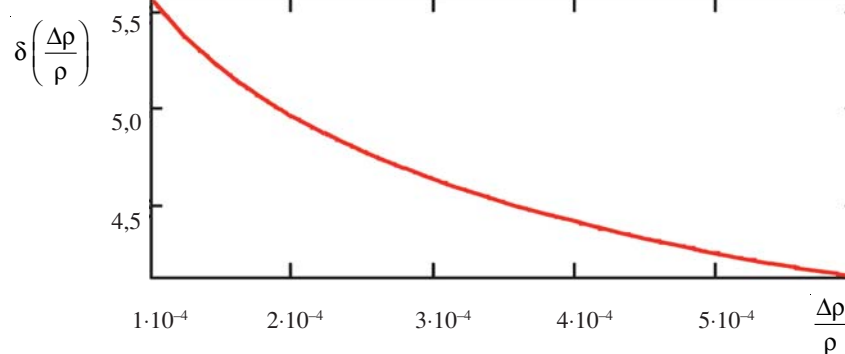


Рис. 6. Зависимость «толщины» слоя вовлечения для условий оголовков ЧОС-2 от разницы плотностей воды в придонном и приповерхностном слоях.

Зависимость толщины слоя вовлечения от разницы плотностей воды в придонном и приповерхностном слоях для условий ЧОС представлена на рис. 6.

Проведенные расчеты показали, что для рассматриваемой ситуации выполняются условия наличия устойчивого стратифицированного потока, из которого возможен селективный отбор с качеством забираемой воды, удовлетворяющим нормативным требованиям по показателю «Общая жесткость».

Результаты численного моделирования

Современные вычислительные технологии позволяют исследовать процессы селективного отбора воды на основе прямых вычислительных экспериментов. При этом непосредственный интерес представляют исследование устойчивости стратификационных течений и оценка возможности организации селективного отбора воды. Такое исследование удобно провести на основе имитационного численного моделирования в трехмерной постановке.

Расчеты были выполнены с использованием пакета вычислительной гидродинамики Fluent 6.3.26. Трехмерный счет, как требующий значительных вычислительных ресурсов, был ограничен областью протяженностью около 10 км от района слияния рек Чусовой и Сылвы до места, где находится оголовок Чусовского водозабора.

На верхних створах рек Чусовой и Сылвы в расчетный домен ставились граничные условия типа VELOCITY-INLET (задавалась скорость течения, вычисленная исходя из расхода воды). На нижнем створе вблизи водозабора ставилось «мягкое» граничное условие типа OUTFLOW. На сво-

бодной поверхности жидкости ставилось граничное условие типа WALL — «свободная поверхность» с отсутствием касательных напряжений. На прочих границах также ставилось условие типа WALL — «твердая стенка».

Использовалась $k - \epsilon$ модель турбулентности. Вычисления проводились в рамках нестационарного изотермического подхода.

При расчете минерализация вод рек Чусовой и Сылвы принимается 250 мг/л и 650 мг/л, соответственно.

Так как рассматриваемая область достаточно велика, и на ее гидродинамический режим существенное влияние могут оказывать не только расходы рек Сылвы и Чусовой, но и режим работы Камской ГЭС и расходы р. Камы, то используется комплексная схема расчетов, рассмотренная в [13]. Моделирование всей нижней части Камского водохранилища, включая Сылвенско-Чусовской плес, проводится в рамках 2D-моделирования с использованием лицензионного пакета SMS 10V.

Полученные результаты расчетов достаточно хорошо воспроизводят наблюдаемую стратификацию в районе оголовков. Стратификация наблюдается не только при расходах, характерных для зимней межени (50—60 м³/с), но и при экстремально низких (15—20 м³/с) (рис. 7).

На основе численного имитационного моделирования была оценена эффективность донных барьеров для организации селективного отбора воды на водозаборах ЧОС-2. Как видно из рис. 8, наличие данных барь-

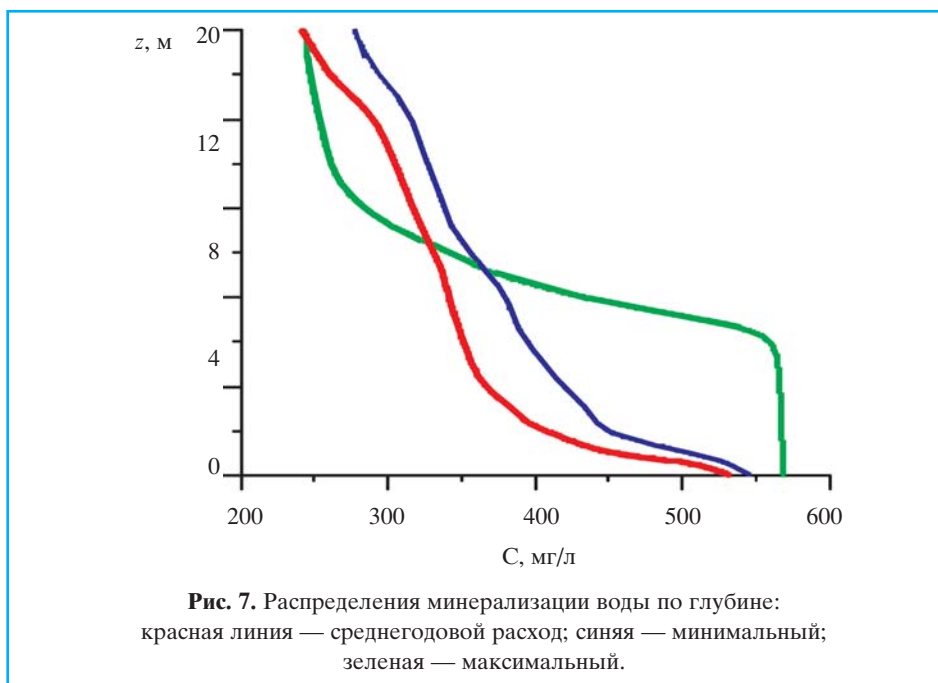


Рис. 7. Распределения минерализации воды по глубине:
красная линия — среднегодовой расход; синяя — минимальный;
зеленая — максимальный.

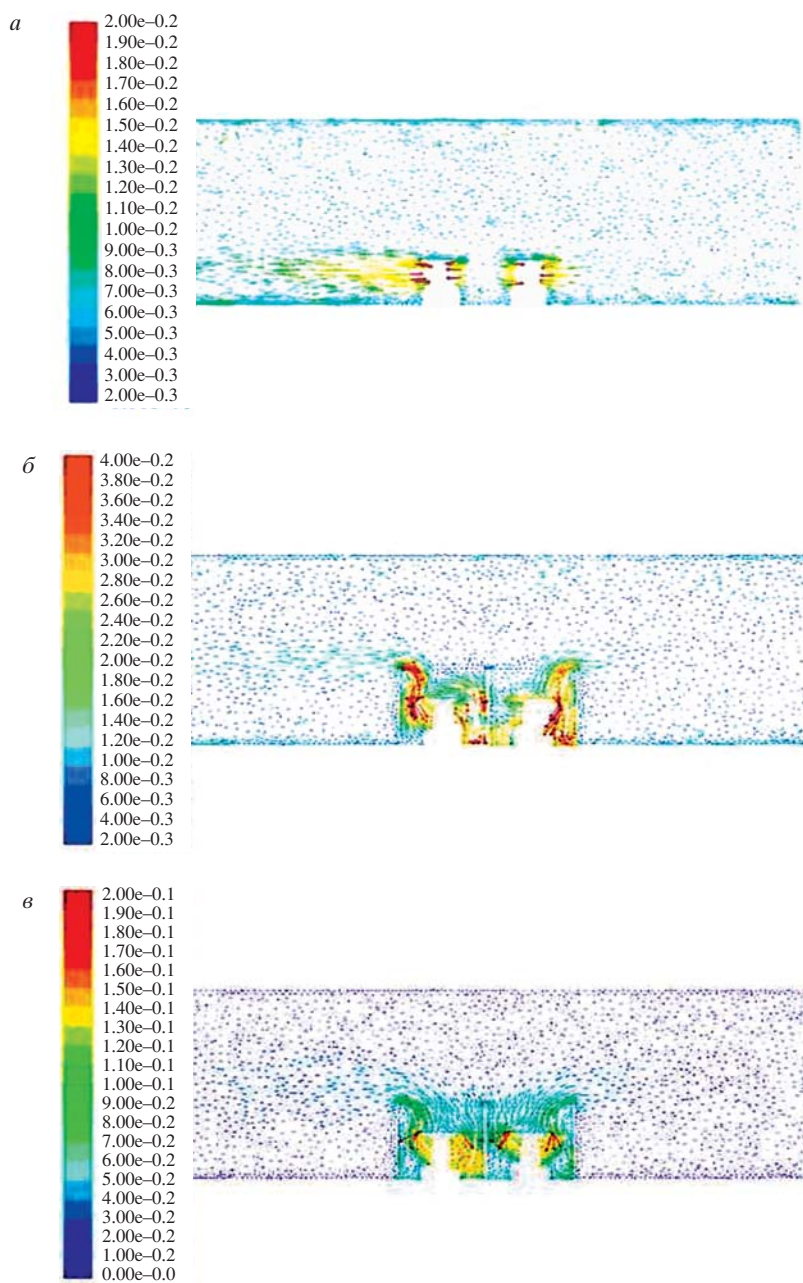


Рис. 8. Векторное поле скорости течения (м/с) вблизи оголовков водозабора:
а — в отсутствие барьеров для скорости забора воды 0,02 м/с, $Fr_p = 0,09$
и при наличии барьеров: *б* — 0,02 м/с, $Fr_p = 0,09$; *в* — 0,08 м/с, $Fr_p = 0,36$.

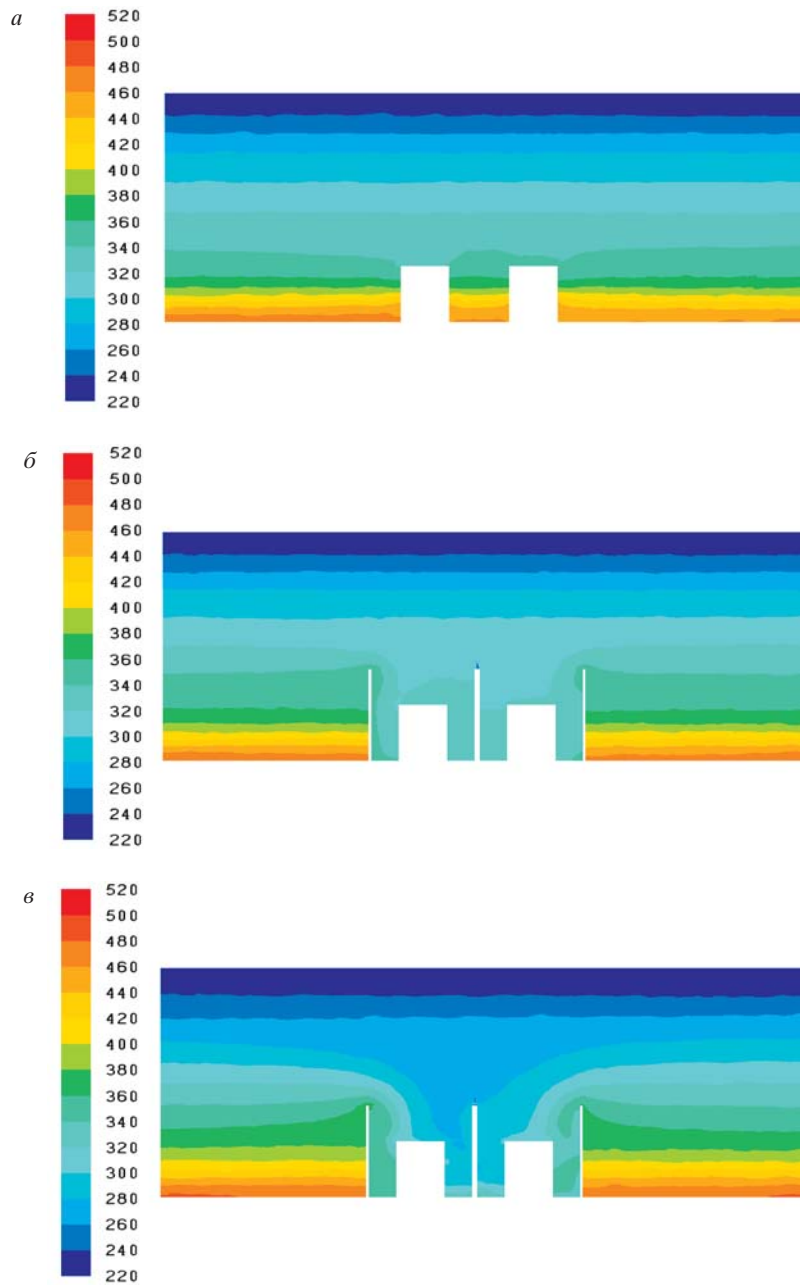


Рис. 9. Поле минерализации воды (мг/л) вблизи оголовков водозабора *a* — в отсутствие барьеров для скорости забора воды 0,02 м/с, $Fr_p = 0,09$ и при наличии барьеров: *b* — 0,02 м/с, $Fr_p = 0,09$; *в* — 0,08 м/с, $Fr_p = 0,36$.

еров принципиально изменяет характер течений и, соответственно, качество забираемой воды.

Водозаборники имеют форму шестигранников с шириной ребра 2,08 м, высота шестигранников составляет 5,5 м, приемные окна высотой 3,5 м располагаются на отметке 2 м. Таким образом, вода забирается «сбоку» водозаборников в диапазоне глубин с 2,0 до 5,5 м.

На рис. 9 представлены поля минерализации воды, соответствующие векторным полям скорости течения, изображенным на рис. 8.

В табл. 1 показана минерализация забираемой воды для каждого из четырех водозаборных оголовков и их среднее в отсутствие и при наличии барьеров; высота барьера принималась для всех оголовков одинаковой и равной 9 м. Как видно из таблицы, эффект донного барьера существенно сказывается на изменении минерализации забираемой воды.

Также были проведены расчеты для высокого расположения плотностного скачка, характерного, как следует из рис. 5, для мартовского входного профиля минерализации воды. Расчеты проводились

Таблица 1. Минерализация забираемая оголовками ЧОС-2 воды в отсутствие и при наличии донных барьеров

| <i>Минерализация забираемой воды (С), мг/л</i> | |
|--|-----------------------------|
| <i>в отсутствие барьеров</i> | <i>при наличии барьеров</i> |
| 550,0 | 305,0 |
| 556,0 | 304,4 |
| 558,0 | 303,8 |
| 562,0 | 307,0 |
| Среднее: 555,0 | Среднее: 305,0 |

Таблица 2. Минерализация забираемой оголовками ЧОС-2 воды при наличии донных барьеров и без них, при мартовском входном профиле минерализации

| <i>Минерализация забираемой воды (С), мг/л</i> | |
|--|-----------------------------|
| <i>в отсутствие барьеров</i> | <i>при наличии барьеров</i> |
| 623,4 | 485,2 |
| 625,3 | 481,7 |
| 627,2 | 480,7 |
| 626,0 | 489,6 |
| Среднее: 625,5 | Среднее: 484,3 |

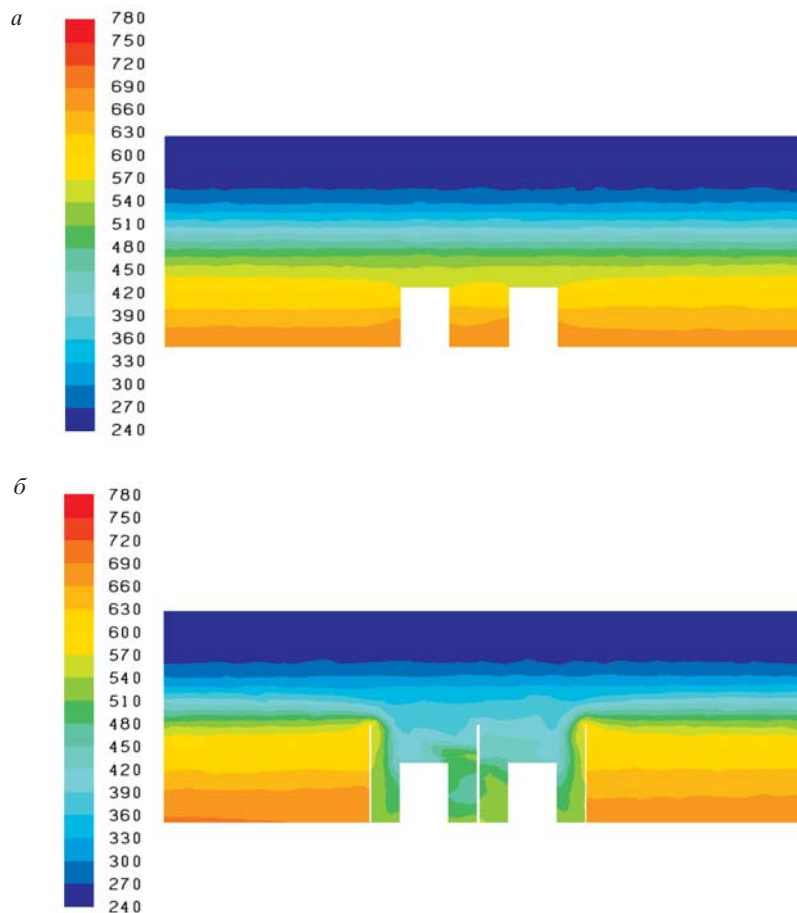


Рис. 10. Поле минерализации воды (мг/л) вблизи оголовков водозабора при высоком расположении слоя скачка $h_b \sim 10$ м (мартовский профиль минерализации):
a — в отсутствие барьеров, *б* — при наличии барьеров.

для двух конфигураций: в отсутствие донных барьеров и при наличии барьеров высотой 9 м. Стандартный забор воды характеризовался объемом 480 тыс. м³/сут, что соответствует скорости забора воды 0,0318 м/с. Ниже представлены поля минерализации забираемой воды (рис. 10) и значения минерализации забираемой воды по четырем оголовкам в сопоставлении вариантов при наличии и отсутствии донных барьеров (табл. 2).

Таким образом, создание донного барьера, обеспечивающего селективный отбор воды, позволяет существенно снизить минерализацию, а соответственно и жесткость забираемой воды.

Выводы

1. Установлено наличие в период зимней межени существенной вертикальной неоднородности распределения минерализации и общей жесткости воды в Чусовском заливе Камского водохранилища.

2. Данная устойчивая стратификация позволяет организовать селективный отбор воды с существенно лучшими потребительскими свойствами, чем при традиционных схемах организации отбора воды.

3. Разработанная трехмерная гидродинамическая модель позволяет воспроизводить основные особенности распределения гидрохимических показателей качества воды в районах расположения водозаборов и оценить основные параметры донных барьеров, позволяющих в значительной мере снизить забор более жесткой воды из придонных слоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изучение качества воды в районе Чусовского водозабора в связи с его расширением // Отчет по НИР / ВНИИОСуголь, рук. А.П. Лепихин. Пермь. 1983. 70 с.
2. Лепихин А.П., Немковский Б.Б., Онянов В.А., Капитанова Е.Н. Селективный отбор воды // Водоснабжение и санитарная техника. 1988. № 3. С. 27—28.
3. Лятхер В.В. Условие формирования плотностного течения в водоемах. В кн.: Труды координационного совещания по гидротехнике. Вып. XI. М. 1964. С. 61—75.
4. Васильев О.Ф. и др. Стратифицированные течения. Итоги науки и техники. Гидромеханика. Т. 8. Изд. ВИНТИ. 1975. С. 75—119.
5. Самолюбов Б.И. Плотностные течения и диффузия примесей. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. 352 с.
6. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. Изд. МГУ. 1998. 175 с.
7. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Часть 1. М.: Изд-во «Наука», 1965. 640 с.
8. Yih C.S. Dynamics of Nonhomogeneous Fluids. Macmillan. New York. 1965.
9. Кейлеган Д.Г. Механизм образования неподвижного клина соленой воды. В кн.: Гидродинамика береговой зоны и эктуариев. Гл. 7. Л.: Гидрометеиздат, 1970.
10. Debler W.R. Stratified flow into a line sink. J. End. Mech. Riv. Proc. Amer. Soc. Civ. End. 1959. V. 85. No. 3.
11. Кинд К.Я., Аверкиев А.Г. Гидравлическое моделирование стратифицированных потоков. В кн.: Материалы международного симпозиума по стратифицированным течениям. Новосибирск. 1972. С. 85—99.
12. Lawrence G.A. Selective withdrawal through a point sink, in Stratified Flows // Proceedings of the Second International Symposium on Stratified Flows, Trondheim, Norway, 24—27 June, 1980. Kluwer, NATO/ASI Series C: 318: P. 519—536.

13. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н. Численное моделирование разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов в турбулентных потоках // Вычислительная механика сплошных сред. № 5. 2010. С. 68—79.

Сведения об авторах:

Лепихин Анатолий Павлович, д. г. н., профессор, заведующий лабораторией, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а; директор, Камский филиал ФГУП РосНИИВХ, 614007, г. Пермь, ул. Народовольческая, 33, e-mail: lepin49@mail.ru

Любимова Татьяна Петровна, д. физ.-мат. н., профессор, заведующий лабораторией, Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 1, e-mail: lubimova@psu.ru

Коновалов Владимир Владиславович, к. физ.-мат. н., инженер-исследователь, Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 1, e-mail: kopov2@psu.ru

Паршакова Янина Николаевна, к. физ.-мат. н., научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 1, e-mail: gadiyatova@psu.ru

Возняк Анна Анатольевна, к. г. н. старший научный сотрудник, Камский филиал ФГУП РосНИИВХ, 614007, г. Пермь, ул. Народовольческая, 33, e-mail: AAvoznyak@gmail.ru

Шумилова Наталья Сергеевна, аспирант, Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 1, e-mail: catulusRus@rambler.ru