

## ПРОБЛЕМЫ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ Г. ПЕРМИ: ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ



*А.П. Лепихин,  
доктор географических наук,  
заведующий лабораторией  
проблем гидрологии суши,  
Горный институт УрО РАН*



*Т.П. Любимова,  
доктор физико-  
математических наук,  
заведующая лабораторией  
вычислительной  
гидродинамики,  
Институт механики сплошных  
сред УрО РАН*

Рассмотрены основные факторы формирования гидрологического и гидрохимического режимов Чусовского залива Камского водохранилища. Показано, что в зимний лимитирующий период по обеспечению устойчивой работы Чусовского водозабора минерализация, общая жесткость воды рек Чусовой, Сылвы существенно различаются. Минерализация, общая жесткость существенно выше в р. Сылве, чем в р. Чусовой. Из-за очень низких скоростей течения, обусловленных подпором от КамГЭС, в зоне их слияния наблюдается существенная вертикальная неоднородность как минерализации, так и общей жесткости, электропроводности воды. При этом дана стратификация наблюдений не только ниже зон слияния, но и выше по течению данных рек. Данная стратификация химического состава воды может успешно использоваться для повышения качества забираемой воды путем организации селективного водозабора. С целью отработки наиболее оптимальных параметров селективного водозабора разработана 3-мерная гидродинамическая модель зон слияния данных рек, воспроизводящая основные особенности стратификации наблюдений при слиянии рек Чусовой и Сылвы.

Основным источником питьевого водоснабжения г. Перми, на который приходится более 70 % общего забора питьевой воды данной городской агломерации, является Чусовской водозабор, расположенный в непосредственной близости от слияния рек Чусовой и Сылвы. При этом данные водотоки имеют достаточно близкую водность, очень существенно различающуюся по гидрохимическому режиму.

Первый исследователь качества воды реки Сылвы Г.В. Хлопин еще в 1889 году писал, что «громаднейшая общая жесткость и очень большой вес плотного остатка заставляет воду реки Сылвы признать слишком жесткой и к употреблению непригодной» [5].

Последующие многочисленные исследования подтвердили данное заключение о высокой жесткости воды реки Сылвы [1, 3]; общая минерализация воды испы-

тывает значительную сезонную зависимость, как правило, изменяясь в интервале 0,4–1,1 г/л.

В то же время ввиду существенного отличия почвенно-геохимических условий водосборной территории жесткость воды реки Чусовой и ее минерализация, а соответственно, и плотность существенно ниже.

Так как жесткость является весьма важным лимитирующим показателем качества воды, снижение которого техническими методами весьма затруднено, возникает естественная задача так организовать забор воды, чтобы она характеризовалась минимальной жесткостью. Решение данной задачи существенно затрудняется весьма сложным гидродинамическим режимом рассматриваемого участка водохранилища, который формируется под совокупным воздействием гидрологического режима рек Чусовой, Сылвы, уровня заполнения Камского водохранилища и режима сброса на Камской ГЭС. В связи с этим возникает серьезная проблема разработки гидродинамической модели качества забираемой воды на данном водозаборе для обработки его оптимальных конструктивных особенностей, с целью уменьшения жесткости воды.

Поэтому необходимо, в первую очередь, рассмотреть особенности формирования гидрологического и гидрохимического режимов данных рек, установить

характер распределения лимитирующих показателей качества воды в Чусовском заливе, районе рассматриваемого водозабора, затем на основе многовариантных расчетов с использованием эффективной гидродинамической модели установить оптимальные конструктивные параметры водозабора, позволяющие максимально ограничить забор более плотных вод с повышенной жесткостью.

Рассматриваемые реки имеют достаточно близкие водосборные площади: Чусовая  $\sim 23 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>, а Сылва  $\sim 19,7 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>. При этом расходы весеннего паводка и летней межени на р. Чусовой значительно больше, чем на Сылве, в то же время расходы зимней межени, в силу особенностей водосборной территории реки Сылвы, больше, чем расходы реки Чусовой. 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 (рис. 1). Данное обстоятельство имеет существенное значение для организации селективного водозабора, так как значительно снижает область возможных значений параметров, определяющих масштабы и устойчивость плотностной стратификации.

В силу особенностей водосборных территорий химический состав данных рек существенно различается. При этом

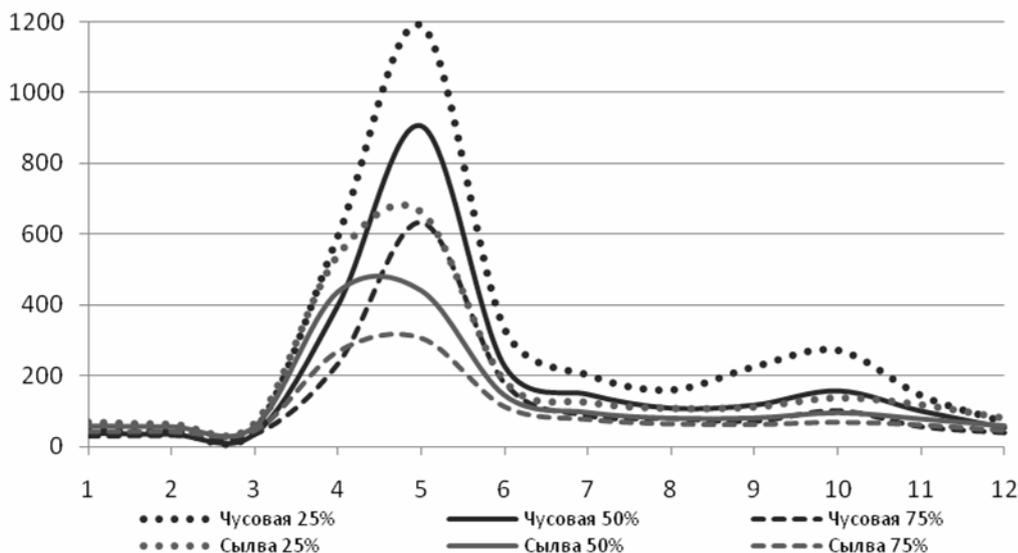


Рис. 1. Динамика среднемесячных расходов воды рек Сылвы у с. Подкаменное и Чусовой у пгт Лямино

различия охватывают не только общую минерализацию, но и соотношение отдельных ингредиентов. Как уже отмечалось, с позиции обеспечения нормативного качества забираемой воды принципиальное значение имеет динамика общей жесткости воды рассматриваемых водотоков, ее зависимость от их расходов воды (рис. 2). Как следует из рис. 2, данные различия особенно существенны в области малых расходов, характерных для лимитирующего периода зимней межени.

ближении «мелкой воды». Для данного участка водохранилища такая модель была построена на основе лицензионного программного продукта SMS.10. Для повышения эффективности расчетных схем использовались адаптированные к морфометрии рассматриваемых водных объектов расчетные сетки. Результаты расчетов достаточно хорошо воспроизводят особенности гидродинамики рассматриваемой области Камского водохранилища.

При этом средние скорости течения в

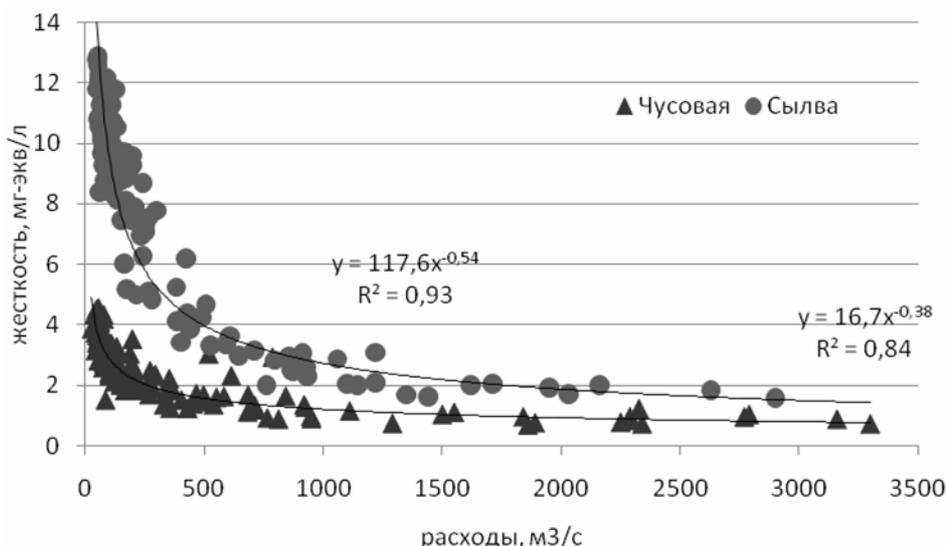


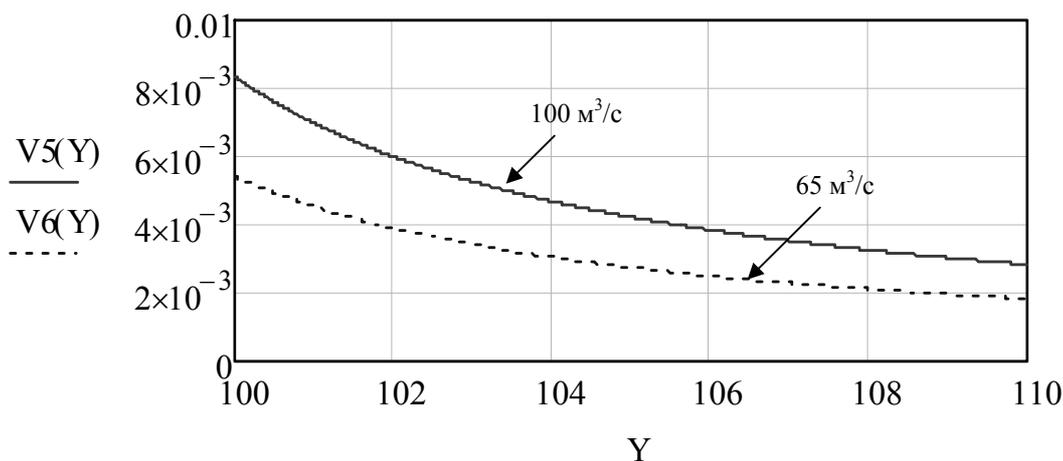
Рис. 2. Зависимость общей жесткости воды рек Сылвы и Чусовой от расходов

Характер и интенсивность процессов смешения вод рассматриваемых водотоков в районе Чусовского водозабора существенно меняется в зависимости не только от расходов воды рек Чусовой и Сылвы, уровня заполнения водохранилища, но и от соотношения минерализации, а соответственно, и плотности воды в рассматриваемых реках. При значительных скоростях течений и малых различиях минерализаций воды, вследствие интенсивного вертикального перемешивания, наблюдается достаточная однородность водных масс по глубине. В этих условиях весьма эффективно использование двух гидродинамических моделей в при-

районе расположения водозабора определяются, в первую очередь, суммарным расходом рек Сылвы и Чусовой и уровнем заполнения водохранилища. Оценка средней скорости течения в районе расположения Чусовского водозабора в меженный период при малых расходах рек Сылвы и Чусовой дана на рис. 3.

Поэтому при резком уменьшении расходов рек скорости их течения становятся весьма малыми (рис. 3) с существенным увеличением различий минерализации вод данных рек, формируется значительная вертикальная неоднородность<sup>1</sup>, наблюдающаяся не только в районе водозабора ниже слияния рек Чусовой и Сылвы

<sup>1</sup> При детальном анализе вертикальной структуры качества воды удобно использовать весьма оперативно измеряемый показатель удельной электропроводности воды. При этом между содержанием общей жесткости и удельной электропроводности воды существует тесная линейная корреляция  $R^2 \sim 0,97$  с уравнением регрессии  $Y_{\text{жест}} = 0,01 \cdot Y_{\text{электр}} - 0,09$ . Такая же очень жесткая корреляция существует между удельной электропроводностью и минерализацией  $R^2 \sim 0,98$  с уравнением регрессии  $Y_{\text{элект}} = 1,35 \cdot Y_{\text{минер}} + 12,14$ .



Уровень воды по посту КамГЭС, м абс

Рис. 3. Зависимость средних скоростей течения от характерных суммарных расходов зимней межени рек Чусовой и Сылвы

(рис. 4), но и в нижнем течении этих рек до их слияния (рис. 5). Как следует из рис. 4, 5, удельная электропроводность, а соответственно<sup>2</sup> и минерализация, общая жесткость воды в придонной области практически в 3 раза выше, чем в поверхностном слое. Такая ситуация обуславливается «подтеканием» более плотной воды р. Сылвы под менее плотные воды Чусовой, соответственно, воды Чусовой «натекают» на воды Сылвы.

Данное обстоятельство весьма существенно, так как до настоящего времени широко обсуждается схема переноса водозабора с целью снижения жесткости забираемой воды непосредственно в русло реки Чусовой в районе д. Переволоки. В условиях значительной вертикальной стратификации, наблюдаемой в зимний лимитирующий период в нижнем течении Чусовой, перенос оголовков становится бессмысленным. В то же время имеется

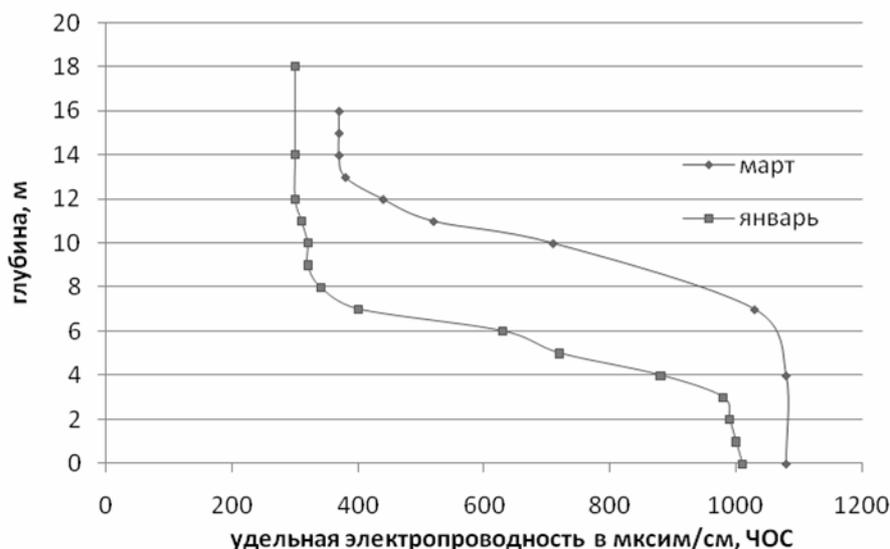


Рис. 4. Изменение удельной электропроводности по глубине на водозаборе Чусовских очистных сооружений (уровень воды КамГЭС в январе – 105,2 м, в марте – 102,7 м)

<sup>2</sup> В реках Сылвы, Чусовой, а также в Чусовском заливе в районе Чусовского водозабора существует весьма тесная линейная корреляция между показателями общей жесткости и минерализации воды  $R^2 \sim 0,95-0,98$ .

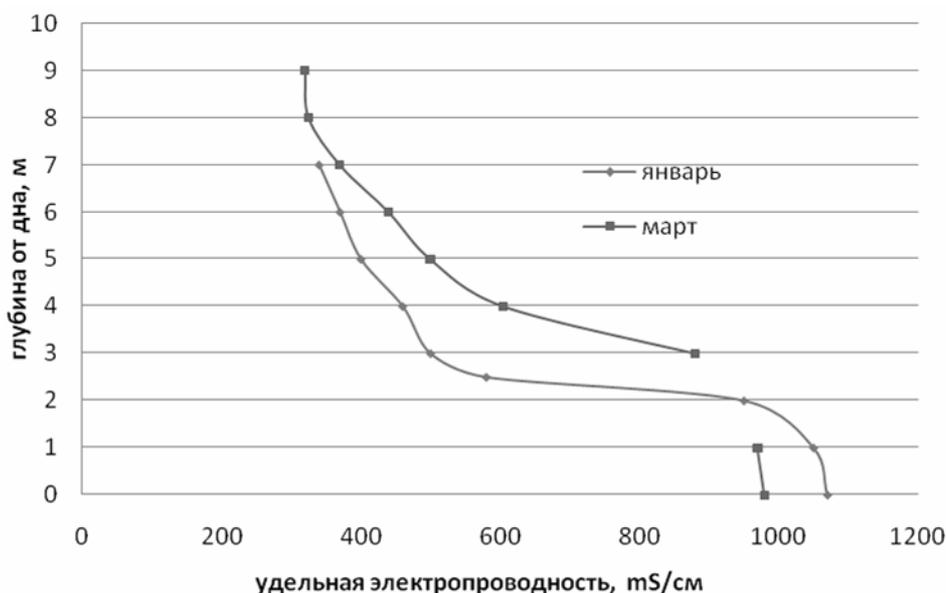


Рис. 5. Изменение удельной электропроводности по глубине на Новояловском водозаборе

возможность существенного снижения жесткости забираемой воды не только на Чусовском водозаборе, но и водозаборе п. Новые Ляды путем организации селективного отбора воды из поверхностных слоев.

Наиболее эффективным приемом, позволяющим в значительной мере «отсекать» забор более минерализованных вод из придонных областей, является создание так называемых донных барьеров [3]. Оптимальные размеры донного барьера определяются исходя из условия обеспечения забора воды из верхних горизонтов при минимальных затратах на его создание.

Для успешного использования данного существенного стратификационного эффекта с целью снижения жесткости воды, в первую очередь, необходимо решить две достаточно тесно связанные между собой задачи:

- оценить устойчивости наблюдаемой стратификации минерализации и жесткости воды в диапазоне возможных изменений расходов рек Сылвы, Чусовой, уровней сработки Камского водохранилища;
- рассчитать параметры донных барьеров, гарантирующих минимальный забор воды из придонной области в условиях значительной, более чем 8 м, сработки водохранилища.

Важнейшей характеристикой, определяющей устойчивость наблюдаемой стратификации, является: различие минерализации и соответственно плотности воды рек Чусовой и Сылвы, скоростей течения в районе водозабора, уровнями заполнения Камского водохранилища. Минерализация воды рассматриваемых рек в силу генезиса в значительной мере зависит от расходов в них воды (см. рис. 2). В период паводков минерализация в реке Сылве изменяется в интервале 0,15–0,25 г/л, а в Чусовой – 0,05–0,07 г/л. В период глубокой зимней межени она существенно вырастает и достигает ~ 0,9–1,1 г/л в реке Сылве, 0,3–0,4 г/л в реке Чусовой. Зависимость между плотностью воды и минерализацией, при данных низких значениях последней, весьма близка к линейной, и принимая, что температура воды в данном случае не является определяющим фактором по сравнению с минерализацией, для лимитирующего зимнего периода имеем

$$\left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \sim (0,3 \div 0,6) \cdot 10^{-3}.$$

Для оценки устойчивости стратификации используется несколько критериев. Наиболее известный – число Ричардсона (отношение работы против сил плавучести к полной энергии турбулентности):

$$R_i \approx \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial Z}}{\rho \left( \frac{\partial V}{\partial Z} \right)^2}.$$

Применительно к рассматриваемым задачам данные критерии можно записать как в [2], где  $H$  – характерная глубина,  $V_*$  – динамическая скорость потока (скорость течения),  $V_* \sim V_{cp} \sqrt{\frac{g}{C}}$ ,  $C$  – коэффициент Шези (согласно аппроксимации,  $C \sim \frac{H^{1/6}}{n}$ , где  $n$  – показатель гидравлической шероховатости русла).

При  $R_i \ll 1$  устойчивость стратификации невозможна, а при  $R_i > 1/4$  должна наблюдаться стратификационная устойчивость.

Выполненные расчеты критерия  $R_i$  при представленных выше значениях определяющих параметров показали, что расчетное значение данного критерия существенно выше критического. При этом в [4] показано: если плотность убывает с высотой по экспоненциальному закону, а профиль скоростей линейный, то устойчивость обеспечивается при  $R_i > 0$ .

В работе [6] для оценки устойчивости рассматриваемой поверхности раздела рекомендуется использовать показатель

$$\theta \sim \frac{\left( v \cdot g \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^{1/3}}{V},$$

где  $V$  – относительная скорость слоев, м/с,  $v$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Согласно [6] при  $\theta > 0,2$  граница раздела рассматриваемых слоев устойчива. Расчеты показали, что при суммарных расходах воды рек Сылвы и Чусовой  $Q \sim 100$  м<sup>3</sup>/с значение  $\theta$  больше критического.

Естественно, для описания данных процессов использование 2-мерных гидродинамических моделей в приближении мелкой воды становится совершенно некорректным. Для решения данной задачи была построена для рассматриваемого участка водохранилища гидродинамическая модель в 3-мерном приближении с

использованием специального коммерческого пакета Fluent 6.3.2. Расчеты проводились с использованием реализующего метода конечных объемов. Использовалась  $k-\varepsilon$  модель турбулентности. Вычисления проводились в рамках нестационарного изотермического подхода. Построенная гидродинамическая модель позволяет воспроизвести основные особенности выявленных процессов взаимодействия рек Сылвы и Чусовой в их зоне слияния. Представленные на рис. 6 результаты расчетов достаточно хорошо воспроизводят наблюдаемые и представленные на рис. 4, 5 особенности вертикальной стратификации качества воды в рассматриваемой зоне водохранилища.

На основе данной модели будут отработаны оптимальные параметры донного барьера, позволяющего значительно снизить забор более плотной и более жесткой воды из придонных слоев.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено наличие в период зимней межени существенно вертикальной неоднородности распределения минерализации, общей жесткости воды в Чусовском заливе Камского водохранилища на вертикалях, расположенных как ниже слияния рек Сылвы и Чусовой, так и на нижних участках рек выше их слияния.

2. Данная устойчивая стратификация, обусловленная очень низкими скоростями течений при существенно различном химическом составе воды рассматриваемых рек, позволяет организовать селективный отбор с целью существенного снижения жесткости забираемой воды.

3. Разработанная гидродинамическая модель в 3-мерном приближении 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.

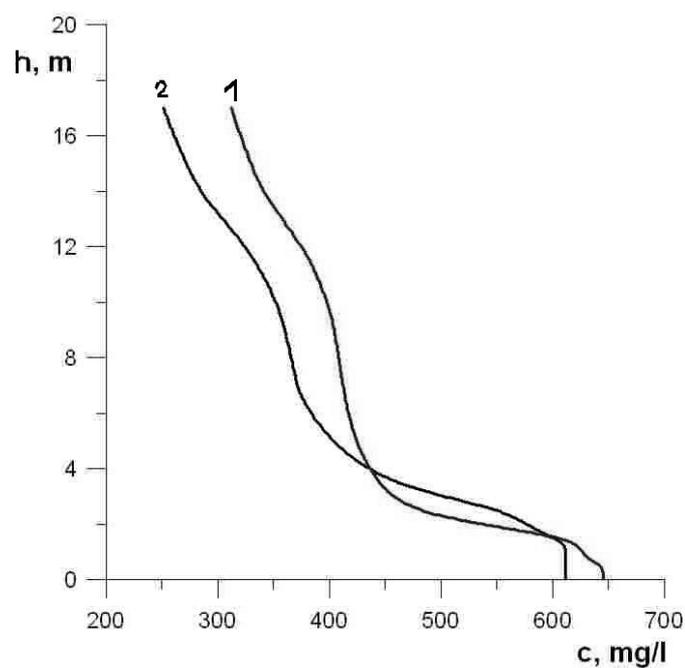


Рис. 6. Распределение «минерализации» воды по глубине на отдельных вертикалях Чусовского залива (1 – в районе Лядовского водозабора, 2 – распределение концентрации в окрестности Чусовского водозабора)

#### Библиографический список

1. Отчет о НИР «Изучить качество воды в районе Чусовского водозабора в связи с его расширением». Отв. исп. Лепихин А.П. – Пермь: ВНИИОСуголь, 1983.
2. Самолюбов Б.И. Плотностные течения и диффузия примесей. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 352 с.
3. Селективный отбор воды / А.П. Лепихин, Б.Б. Немковский, В.А. Онянов, Е.Н. Капитанова // Водоснабжение и санитарная техника. – 1988. – № 3. – С. 27–28.
4. Фидман Б.А. Турбулентность водных потоков. –Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 237с.
5. Хлопин Г.В. По поводу анализов вод, сделанных в санитарной станции // Сб. работ Пермской земской санитарной станции. – Пермь, 1889. – Вып. 1. – 104 с.
6. Kuelegan G.H. Interfacial instability and miming in stratified flows // J. Res. Nat. Bur. Standrs. – 1967. – Vol. 43. – № 5.