

УДК 628.3

Д.В. СТАЛИНСКИЙ, докт. техн. наук, профессор, генеральный директор,**С.И. ЭПШТЕЙН**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,**З.С. МУЗЫКИНА**, канд. техн. наук, ученый секретарь, **А.Ю. КАПУСТЯК**, научный сотрудник

Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь» (ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Показано, что при создании бессточных оборотных систем водоснабжения с предварительным обессоливанием подпиточной воды мембранными методами в ряде случаев целесообразно предусматривать отбор части воды из оборотных циклов и ее подачу на установку обессоливания. Рассмотрена возможность оценки расхода воды, отбираемой из оборотных циклов водоснабжения с целью поддержания в них допустимых концентраций химических компонентов. Получены уравнения для определения расхода отбираемой воды.

Ключевые слова: оборотные циклы, бессточная система, обессоливание воды, отбор воды из оборотных циклов.

Оборотное водоснабжение и повторное использование воды – одно из важнейших направлений в области защиты окружающей природной среды, энерго- и ресурсосбережения, в связи с чем разработке и проектированию оборотных систем водоснабжения в ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» всегда уделялось достаточное внимание.

Однако задачи, стоящие перед исследователями и проектировщиками, работающими в этой области, в последнее время значительно усложнились. Еще 15–20 лет назад для подпитки оборотных циклов водоснабжения чаще всего использовалась речная вода без всякой предварительной подготовки, а продувочная вода, не содержащая механических примесей и нефтепродуктов, беспрепятственно сбрасывалась в водоем. В настоящее время требования по химсоставу оборотной воды порой жестче показателей, характерных для свежей воды из источника, а качество продувочной воды должно соответствовать требованиям, предъявляемым к воде водоемов рыбохозяйственного назначения (хотя в тех водоемах, куда осуществляется продувка, вода не всегда отвечает установленным нормативам).

С другой стороны, ужесточились требования к составу воды, которая может сбрасываться в водоемы при продувке оборотных систем водоснабжения. Данные требования определяются новыми нормами качества воды в водоемах хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного назначений. В [1] приведены предельные концентрации хлоридов и сульфатов в воде

условно-чистых оборотных циклов: $(\text{SO}_4^{2-}) = 500 \text{ мг/дм}^3$, $(\text{Cl}^-) = 350 \text{ мг/дм}^3$.

Зарубежные фирмы, поставляющие дорогостоящее оборудование, предъявляют жесткие требования к используемой воде по содержанию хлоридов и сульфатов. Например, при проектировании одного сталепрокатного завода в России необходимо было выдержать следующие нормы по сульфатам и хлоридам: $(\text{SO}_4^{2-}) \leq 300 \text{ мг/дм}^3$; $(\text{Cl}^-) \leq 150 \text{ мг/дм}^3$. В связи с этим в последнее время при проектировании систем оборотного водоснабжения нередко ликвидируют продувку оборотных систем и предусматривают обессоливание подпиточной воды, чтобы удовлетворить требованиям технического задания к качеству оборотной воды.

Наряду с условно-чистыми оборотными циклами водоснабжения, которые подразделяются на закрытые и открытые, существуют так называемые грязные циклы, т.е. такие, в которых вода в процессе использования загрязняется. Условно-чистые оборотные циклы создаются в основном в целях охлаждения агрегатов, установок, деталей и т.д. В закрытых циклах вода не соприкасается с воздухом и не может испариться. Следовательно, теоретически ее химсостав должен оставаться неизменным в течение длительного времени. В открытых оборотных циклах (как в условно-чистых, так и в грязных) вода соприкасается с воздухом. В условно-чистых открытых оборотных циклах используемая для охлаждения вода нагревается и затем охлаждается на градирнях



либо в брызгальных бассейнах. Часть ее при этом испаряется, часть уносится в виде капель. Такие же процессы происходят и в грязных оборотных циклах, если вода в них используется для охлаждения.

Итак, потери воды в оборотных циклах $Q_{пот}$ складываются из потерь на испарение $Q_{и}$, каплеунос $Q_{к}$ и продувку $Q_{пр}$, причем $Q_{к}$ и $Q_{пр}$ – это потери в виде капельной влаги. Расход воды на подпитку равен сумме потерь

$$Q_{подп} = Q_{пот} = Q_{и} + Q_{к} + Q_{пр} \quad (1)$$

При этом количество воды, удаляемой из оборотного цикла в виде капельной влаги, меньше (причем иногда значительно) расхода подпиточной воды. Это приводит к повышению концентрации в оборотной воде тех компонентов, которые не выпадают в осадок и не улетучиваются (например, ионов Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+). Коэффициент концентрирования (упаривания) равен

$$K_y = \frac{Q_{и} + Q_{к} + Q_{пр}}{Q_{к} + Q_{пр}} \quad (2)$$

Если создается бессточная система водоснабжения, то продувка отсутствует и $Q_{пр} = 0$, тогда

$$K_y = \frac{Q_{и} + Q_{к}}{Q_{к}} \quad (3)$$

В современных градирнях потери на каплеунос могут составлять 0,01 % и менее, в то время как потери на испарение, как правило, превышают 1 %. Таким образом, коэффициент концентрирования достигает 100 % и более. Это приводит к тому, что даже после обессоливания подпиточной воды концентрация солевых компонентов в воде оборотных циклов бывает весьма значительной.

В качестве примера рассмотрим обобщенную схему водного хозяйства предприятия, на котором предусмотрено строительство двух условно-чистых оборотных циклов (рис. 1).

Исходные данные по оборотным циклам приведены в табл. 1.

Основными регламентирующими компонентами химсостава являются хлориды и сульфаты. Пусть, например, содержание этих компонентов в исходной речной воде составляет 185 и 650 мг/дм³, а указанные в техническом задании допустимые концентрации в оборотных циклах – соответственно 150 и 300 мг/дм³. Чтобы определить, до какой степени следует снизить содержание компонентов в подпиточной воде для достижения заданных параметров в оборотных циклах, показатели допустимых концентраций необходимо разделить на коэффи-

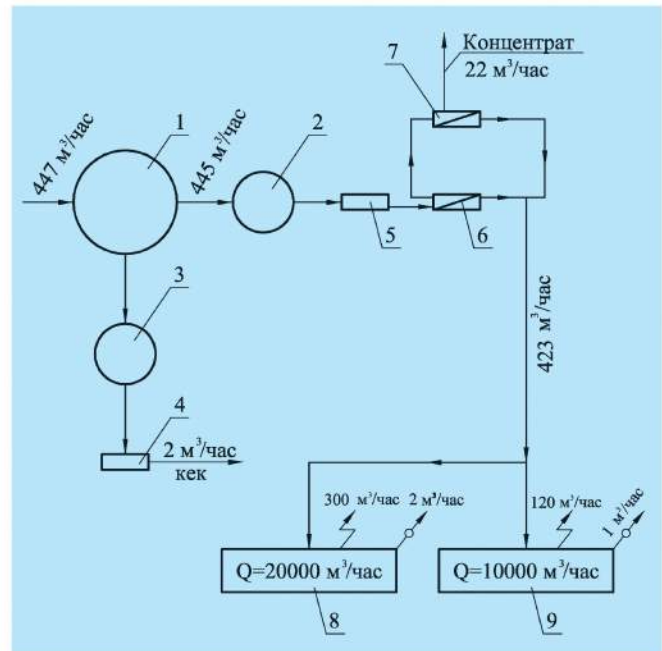


Рисунок 1 – Схема оборотного водоснабжения и водоподготовки с обессоливанием воды методом обратного осмоса:

1 – осветлители; 2 – фильтры; 3 – сгустители; 4 – фильтр-пресс; 5 – установка ультрафильтрации; 6 – первая ступень установки обратного осмоса; 7 – вторая ступень установки обратного осмоса; 8, 9 – оборотные циклы водоснабжения производительностью 20 тыс. и 10 тыс. м³/час

циенты упаривания (151 для первого оборотного цикла и 121 – для второго).

Общий расход подпиточной воды составляет $302 + 121 = 423$ м³/час, общий выход пермеата после установки обратного осмоса – 95 %. Следовательно, на установку обратного осмоса необходимо подать $Q_0 = 423 : 0,95 = 445$ м³/час воды, а на установку предварительной обработки – 447 м³/час воды (с учетом того, что с обезвоженным шламом будет потеряно 2 м³/час воды).

Содержание в поступающей воде сульфатов – 650 мг/дм³, хлоридов – 185 мг/дм³. Селективность установки обратного осмоса по сульфатам ~ 96 %, по хлоридам ~ 98 %. Значит, их содержание в пермеате составит:

$$(SO_4^{2-}) = 13 > 4,13 > 2,0 \text{ мг/дм}^3; (Cl^-) = 7,4 > 1,25 > 1,0 \text{ мг/дм}^3.$$

Таким образом, установка обратного осмоса не обеспечивает требуемой степени обессоливания подпиточной воды. Для ее достижения в схему водоподготовки необходимо включить дополнительную ступень глубокого обессоливания (например, установку деионизации или обратного осмоса) в расчете на расход 423 м³/час обессоленной воды (рис. 2).

Таблица 1 – Исходные параметры оборотных циклов

Параметры	Единица измерения	Значения параметров	
		1-й оборотный цикл	2-й оборотный цикл
Расход оборотной воды	м³/час	20000	10000
Потери воды на испарение	%	1,5	1,2
Потери воды на каплеунос на градирнях, Q _к	м³/час	300	120
	%	0,01	0,01
Общие потери воды, Q _{Общ}	м³/час	2	1
Кoeffициент концентрирования раствора: K _у = Q _{Общ} / Q _к	–	302	121
ПДК основных ингредиентов, по которым осуществляется контроль:	мг/дм³	151	121
C _{пр}			
SO ₄ ²⁻		300	500
Cl ⁻		150	150
Максимальные концентрации основных ингредиентов в подпиточной воде, при которых не будет превышения допустимых концентраций в оборотной воде:	мг/дм³		
SO ₄ ²⁻		2,0	4,13
Cl ⁻		1,0	1,25

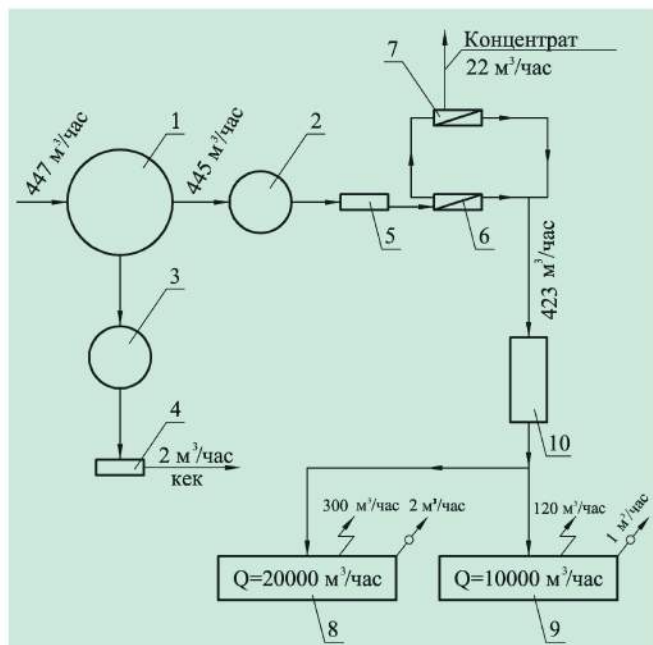


Рисунок 2 – Схема оборотного водоснабжения и водоподготовки с обессоливанием воды методом обратного осмоса и дополнительной ступенью деминерализации:

1 – осветлители; 2 – фильтры; 3 – сгустители; 4 – фильтр-пресс; 5 – установка ультрафильтрации; 6 – первая ступень установки обратного осмоса; 7 – вторая ступень установки обратного осмоса; 8, 9 – оборотные циклы водоснабжения производительностью 20 тыс. и 10 тыс. м³/час; 10 – установка дополнительного обессоливания

Если же осуществить отбор воды из оборотных циклов с расходами Q_{от1}, Q_{от2} и подать эти воды на станцию предварительной очистки, а затем на установку обратного осмоса (рис. 3), то расход воды, которую необходимо подвергнуть очистке, значительно уменьшится.

Для определения расхода воды, который необходимо передать из оборотных циклов на стадию предварительной обработки, была получена система уравнений, вывод которых приведен ниже.

Предположим, имеется n оборотных циклов и заданы допустимые концентрации какого-либо компонента в воде этих циклов: C_{об1}, C_{об2}, ... C_{обn}. Для каждого оборотного цикла можно составить уравнение баланса солей

$$C_{обі} = C_{доб} \cdot \frac{Q_{иі} + Q_{кі} + Q_{оті}}{Q_{кі} + Q_{оті}}, \tag{4}$$

где C_{доб} – концентрация рассматриваемого ингредиента в подпиточной воде, т.е. в пермеате после установки обратного осмоса; Q_{иі}, Q_{кі}, Q_{оті} – расходы воды соответственно на испарение и каплеунос, а также расход воды, передаваемой на станцию предварительной обработки из i-го оборотного цикла (этот параметр пока неизвестен).

$$C_{доб} = C_{пост} \cdot (1 - R), \tag{5}$$

где C_{пост} – концентрация рассматриваемого компонента в воде, поступающей на установку обратного осмоса; R – селективность установки, т.е. доля ингредиента, удаляемого из единицы объема пермеата, по отношению

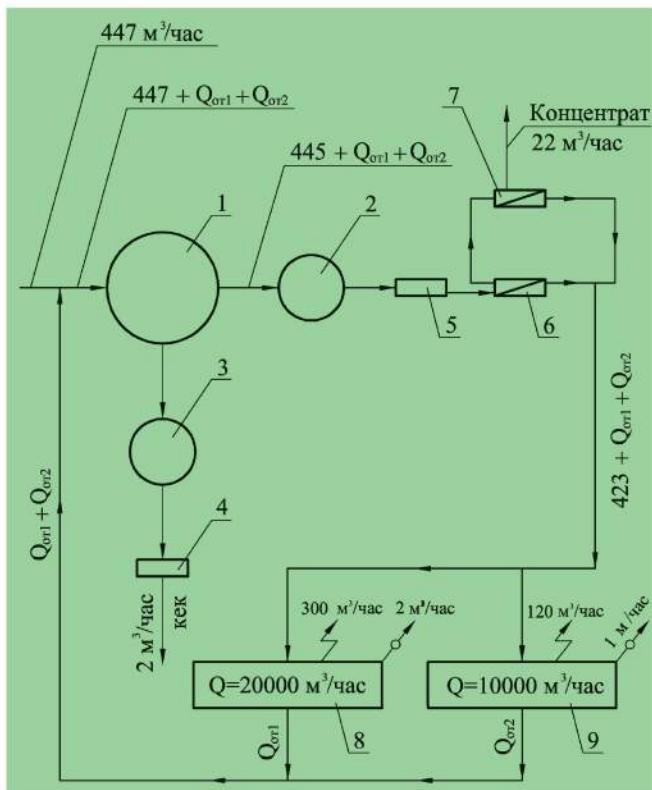


Рисунок 3 – Схема оборотного водоснабжения и водоподготовки с обессоливанием воды методом обратного осмоса и отбором воды из оборотных циклов:

1 – осветлители; 2 – фильтры; 3 – сгустители; 4 – фильтр-прессы; 5 – установка ультраfiltrации; 6, 7 – первая и вторая ступени установки обратного осмоса; 8, 9 – оборотные циклы водоснабжения производительностью 20 тыс. и 10 тыс. м³/час

к исходной концентрации ($R = \frac{C_0 - C_p}{C_0}$, где C_0 и C_p – концентрации ингредиента в исходной воде и пермеате [2]). В свою очередь,

$$C_{\text{пост}} = \frac{C_0 \cdot Q_0 + \sum_{i=1}^n C_{\text{оби}} \cdot Q_{\text{оти}}}{Q_0 + \sum_{i=1}^n Q_{\text{оти}}} \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5) и далее в (4), приходим к уравнению

$$C_{\text{оби}} = \frac{C_0 \cdot Q_0 + \sum_{i=1}^n C_{\text{оби}} \cdot Q_{\text{оти}}}{Q_0 + \sum_{i=1}^n Q_{\text{оти}}} \times (1-R) \cdot \frac{Q_{\text{ии}} + Q_{\text{ки}} + Q_{\text{оти}}}{Q_{\text{ки}} + Q_{\text{оти}}} \quad (7)$$

Таких уравнений будет n – по числу оборотных циклов, получающих подпиточную воду от одной и той же установки водоподготовки. Они составляют систему нелинейных уравнений с n неизвестными $Q_{\text{оти}}$. Количество

подобных систем равно количеству ингредиентов, величины концентраций которых в оборотных циклах должны быть ограничены.

Система нелинейных уравнений может быть решена любым из известных численных методов – например градиентным. В качестве начального приближения можно принять значение $Q_{\text{оти}}^0$, полученное из условия баланса поступления в i -й оборотный цикл и вывода из него указанного компонента:

$$Q_{\text{оти}}^0 = \frac{\frac{C_{\text{пост}}}{C_{\text{доп}i}} \cdot (Q_{\text{ии}} + Q_{\text{ки}}) - Q_{\text{ки}}}{1 - \frac{C_{\text{пост}}}{C_{\text{доп}i}}} \quad (8)$$

Для рассматриваемого примера с двумя оборотными циклами ($n=2$) определим значения продувочных расходов $Q_{\text{пр1}}$ и $Q_{\text{пр2}}$, необходимых для поддержания предельных максимальных концентраций хлоридов и сульфатов:

$$\begin{aligned} Q_0 &= 445 \text{ м}^3/\text{час}; & \left(\text{SO}_4^{2-} \right)_{\text{об2}} &= 800 \text{ мг/дм}^3; \\ Q_{\text{пр1}} &= 300 \text{ м}^3/\text{час}; & \left(\text{Cl}^- \right)_{\text{об2}} &= 185 \text{ мг/дм}^3; \\ Q_{\text{к1}} &= 2 \text{ м}^3/\text{час}; & \left(\text{Cl}^- \right)_0 &= 150 \text{ мг/дм}^3; \\ Q_{\text{пр2}} &= 120 \text{ м}^3/\text{час}; & \left(\text{Cl}^- \right)_{\text{об1}} &= 200 \text{ мг/дм}^3; \\ Q_{\text{к2}} &= 1 \text{ м}^3/\text{час}; & R_{\text{SO}_4^{2-}} &= 98 \% = 0,98; \\ \left(\text{SO}_4^{2-} \right)_{\text{об1}} &= 650 \text{ мг/дм}^3; & R_{\text{Cl}^-} &= 96 \% = 0,96. \\ \left(\text{SO}_4^{2-} \right)_0 &= 300 \text{ мг/дм}^3; \end{aligned}$$

Поскольку значения отбираемых расходов определяются из условия поддержания требуемой концентрации всего двух ингредиентов, необходимо рассмотреть две системы уравнений – по два уравнения (по числу оборотных циклов) в каждой. Система уравнений для определения $Q_{\text{пр1}}$ и $Q_{\text{пр2}}$, составленная исходя из условия поддержания предельной концентрации сульфатов, имеет вид:

$$\begin{aligned} 300 &= \frac{650 \cdot 445 + 300 \cdot Q_{\text{от1}} + 500 \cdot Q_{\text{от2}}}{445 + Q_{\text{от1}} + Q_{\text{от2}}} \times \\ &\times (1-0,98) \cdot \frac{300 + 2 + Q_{\text{от1}}}{2 + Q_{\text{от1}}}, \\ 500 &= \frac{650 \cdot 445 + 300 \cdot Q_{\text{от1}} + 500 \cdot Q_{\text{от2}}}{445 + Q_{\text{от1}} + Q_{\text{от2}}} \times \\ &\times (1-0,98) \cdot \frac{120 + 1 + Q_{\text{от1}}}{1 + Q_{\text{от1}}} \end{aligned}$$

Запишем аналогичную систему с учетом условия поддержания предельной концентрации хлоридов:

$$\begin{aligned} 150 &= \frac{185 \cdot 445 + 150 \cdot Q_{\text{пр1}} + 150 \cdot Q_{\text{пр2}}}{445 + Q_{\text{пр1}} + Q_{\text{пр2}}} \times \\ &\times (1-0,96) \cdot \frac{300 + 2 + Q_{\text{пр1}}}{2 + Q_{\text{пр1}}} \end{aligned}$$

$$150 = \frac{185 \cdot 445 + 150 \cdot Q_{пр1} + 150 \cdot Q_{пр2}}{445 + Q_{пр1} + Q_{пр2}} \times \\ \times (1 - 0,96) \cdot \frac{120 + 1 + Q_{пр1}}{1 + Q_{пр1}}$$

Решением первой системы уравнений являются значения $Q_{от1} \approx 11$, $Q_{от2} \approx 2$, а второй системы – $Q_{от1} \approx 13$, $Q_{от2} \approx 5$. Принимая большие значения $Q_{от1}$ и $Q_{от2}$, получим: $Q_{от1} = 13 \text{ м}^3/\text{час}$, $Q_{от2} = 5 \text{ м}^3/\text{час}$, откуда $Q_{от1} + Q_{от2} = 18 \text{ м}^3/\text{час}$.

Таким образом, путем отбора незначительной части воды из оборотных циклов и передачи ее на узел предварительной обработки можно поддерживать требуемую концентрацию основных солеобразующих ингредиентов (в данном случае хлоридов и сульфатов) на уровнях, не превышающих максимально допустимые, предусмотрев заранее увеличение производительности узла предварительной обработки и установки обратного осмоса на $18 \text{ м}^3/\text{час}$. При этом отпадает необходимость в дополнительных установках обессоливания, что позволяет сократить капитальные и эксплуатационные расходы.

При расчетах может оказаться, что каждому компоненту соответствует свое значение отбираемого расхода. Однако анализ выражения (8) позволяет заключить, что $Q_{от}$ растет с увеличением $C_{дрб}/C_{доп}$. Следовательно, необходимо определить, для какого компонента величина $C_{дрб}/C_{доп}$ принимает наибольшее значение, и с учетом этого вычислить $Q_{от}$.

Например, для первого оборотного цикла:

- по хлоридам: $\frac{C_{дрб}}{C_{доп}} = \frac{7,4}{150} = 0,049$;
- по сульфатам: $\frac{C_{дрб}}{C_{доп}} = \frac{13}{300} = 0,043$.

Для второго оборотного цикла:

- по хлоридам: $\frac{C_{дрб}}{C_{доп}} = \frac{7,4}{150} = 0,049$;
- по сульфатам: $\frac{C_{дрб}}{C_{доп}} = \frac{13}{500} = 0,026$.

Таким образом, для обоих оборотных циклов расход отбираемой воды следует определять из условия поддержания требуемой концентрации хлоридов (т.е. в нашем случае можно было ограничиться решением только второй системы уравнений).

Наконец, если в системе водоснабжения всего один оборотный цикл, получающий воду от установки водоподготовки, отбираемый расход может быть определен

решением квадратного уравнения, которое можно получить из системы уравнений (4), если принять, что все расходы и концентрации с индексами $i > 1$ равны нулю:

$$A \cdot Q_{от}^2 + B \cdot Q_{от} + D = 0, \tag{9}$$

$$Q_{от} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot D}}{2 \cdot A}, \tag{10}$$

где $A = \frac{C_{об}}{C_0}$;

$$B = \frac{C_{об}}{C_0} \cdot [Q_0 + Q_k - Q_k \cdot (1-R) - Q_n \cdot (1-R)] - Q_0 \cdot (1-R);$$

$$D = Q_0 \cdot \left[\frac{C_{об}}{C_0} \cdot Q_k - (Q_n + Q_k) \cdot (1-R) \right].$$

Итак, на примере анализа схемы бессточного водоснабжения предприятия показано, как можно оценить величину расхода воды, необходимого для поддержания допустимых концентраций химических компонентов в оборотных циклах. Кроме того, получены уравнения для определения продувочных расходов в случае, когда обессоленная вода используется для подпитки двух оборотных циклов, а также уравнение, допускающее аналитическое решение и позволяющее определить необходимый продувочный расход для простейшей схемы водоснабжения (один оборотный цикл с установкой обессоливания).

ВЫВОДЫ

Рассмотрены новые требования к качеству воды в системах оборотного водоснабжения, обусловленные ужесточением норм природоохранного законодательства и необходимостью обеспечить технические условия осуществления производственных процессов.

Предлагаемое техническое решение – отбор части воды из оборотных циклов с возвратом ее на узел предварительной очистки и обессоливанием мембранными методами (в частности, обратным осмосом) – учитывает эти требования и позволяет сократить капитальные и эксплуатационные затраты при создании и обслуживании бессточных систем водоснабжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вахлер, Б.Л. Водоснабжение и водоотведение на металлургических предприятиях / Б.Л. Вахлер. – М. : Металлургия, 1977. – 320 с.
2. Карелин, Ф.Н. Обессоливание воды обратным осмосом / Ф.Н. Карелин. – М. : Стройиздат, 1988. – 208 с.

Поступила в редакцию 02.08.2013



Показано, що при створенні безстічних оборотних систем водопостачання з попереднім знесоленням підживлювальної води мембранними методами в ряді випадків доцільно передбачати відбір частини води з оборотних циклів і її подачу на установку знесолення. Розглянуто можливість оцінки витрати води, відібраної з оборотних циклів водопостачання з метою підтримки в них допустимих концентрацій хімічних компонентів. Одержано рівняння для визначення витрати відібраної води.

It is shown that at setting-up of effluent-free closed-circuit water supply systems with preliminary desalting of make-up water by membrane methods [such as reverse osmosis], it is expedient in some cases to provide water withdrawal from circulating system and its feeding to desalting plant. Possibility of assessment of water discharge withdrawn from circulating system to maintain the concentration of chemical components in circulating water supply system within the prescribed limits is considered. The equations for calculating rate of water withdrawn from a system were obtained.