

## НАДЕЖНОСТЬ ОХЛАДИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Валерий Новохатний, Сергей Костенко

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка  
 Адрес: Украина, 36011, г Полтава, Первомайский проспект, 24  
 E-mail: kanc@pntu.edu.ua

**Аннотация.** Разработан метод и даны примеры расчета надежности охладительных систем оборотного водоснабжения металлургического производства на примере сталелитейного завода. Показана возможность расчета надежности водопроводного комплекса, который включает циркуляционную насосную станцию, градирни, напорную и самотечную водопроводную сеть.

**Ключевые слова:** охладительные системы оборотного водоснабжения, надежность.

## ВВЕДЕНИЕ

По назначению воду в промышленном производстве делят [1] на четыре категории и используют ее как:

– **I категория** – **теплоноситель** при охлаждении промышленных агрегатов или продукта через стенку теплообменника; при этом вода только нагревается и не загрязняется.

– **II категория** – **среда для транспортирования** механических и растворенных примесей (при очистке сырья или продукта, обогащении, литье, удалении золотшлаков и т.д.); при этом вода только загрязняется и не нагревается.

– **III категория** – **теплоноситель и среда для транспортирования** механических и растворенных примесей (при непосредственном и одновременном охлаждении, литье, обогащении, очистке сырья или продукта); при этом вода нагревается и загрязняется.

– **IV категория** – **непосредственный технологический продукт**; при этом, как правило, требуется специальная подготовка воды.

В зависимости от способа использования воды и местных технико-экономических условий строят следующие системы производственного водоснабжения:

– **прямоточные** – вода, которая отработала на производстве, сбрасывается в водоем без очистки или с предварительной очисткой ее на очистных сооружениях; при этом вода используется единовременно;

– с **последовательным (каскадным) использованием воды** – вода, которая отработала в одном технологическом процессе, используется повторно в другом процессе, а потом сбрасывается в водоем без очистки или с предварительной очисткой на очистных сооружениях; при этом вода последовательно используется два, реже три раза;

– **оборотные** – вода, которая отработала в технологическом процессе, соответственно обрабатывается и вновь возвращается на производство; при этом вода используется в технологическом процессе многократно;

– **смешанные** – на промышленном предприятии существуют, обычно, как отдельные циклы, так и

последовательные и прямоточные схемы использования воды на производстве.

Воду I категории в системе оборотного водоснабжения перед повторным использованием только охлаждают. Назовем такие системы водоснабжения охладительными системами оборотного водоснабжения (ОСОВ). Воду II категории в системе оборотного водоснабжения только очищают от загрязнений, а воду III категории в системах оборотного водоснабжения сначала очищают, а потом охлаждают.

Принцип действия схемы охладительной системы оборотного водоснабжения (ОСОВ) состоит в многократном повторном использовании воды в технологическом процессе. Учитывая то, что вода в технологическом процессе только нагревается, для возвращения ее в оборотный цикл требуется только охлаждение.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Водоснабжение промышленных предприятий представляет собой значительную и неотъемлемую часть во всей отрасли водоснабжения. Поэтому многие ученые направляли свои усилия на решение проблем, которые возникают в производственном водоснабжении. Часть из таких исследований относится к системам в целом, например работы Н.Н. Абрамова [1], А.Ф.Шабалина [23, 24], Кучеренко Д.И. [11], Вахлера Б.Л. [3], Серикова Н.Ф. [5], Андоньева С.М. [2] и др. Значительное количество работ посвящено исследованию отдельных сооружений, например работы Гладкова В.А. [7], Гончарова В.В. [8], Фарфоровского Б.С. [20], Вахлера Б.Л. [4], Семенюка В.Д. [6] и др. Вопросы надежности систем производственного водоснабжения рассматривались в целом, предлагались методы структурного резервирования отдельных сооружений и элементов, но количественной оценки по современным показателям надежности не выполнялось. Объясняется это тремя основными причинами – во-первых, методы современной теории надежности еще только начинают проникать в различные отрасли техники и, в том числе, в водоснабжение; во-вторых, классические методы

математической теории надежности достаточно сложны и для внедрения их в инженерную практику требуется разработка соответствующих инженерных методик расчета; в-третьих, расчеты надежности можно вести только в том случае, когда накоплена соответствующая (репрезентативная) база статистических данных по надежности отдельных элементов. Однако, практика эксплуатации систем производственного водоснабжения промышленных предприятий показывает, что необходимости четкого учета повреждаемости не уделяется должного внимания оборудованию отдельных водопроводных сооружений. Отдельно можно отметить только работу д-ра техн. наук В.С. Пономаренко [15] в которой даны количественные показатели надежности отдельных элементов вентиляторных градирен.

### ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Надежность водоснабжения, как технологического процесса, определяет надежность отдельных сооружений системы водоснабжения промышленного предприятия. При этом необходимо, в первую очередь, решить [13] следующие задачи.

Во-первых, учитывать то, что надежность – это комплексное свойство объекта или сооружения, которое включает четыре составляющих этого свойства: безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость; необходимо определить какие из этих четырех свойств являются определяющими и подлежат анализу.

Во-вторых, перед расчетами показателей надежности надо сначала определиться с тем, какие показатели надежности следует использовать. Показателей надежности достаточно много, но надо из них выбрать основные для конкретных сооружений и элементов и разрабатывать методику расчета именно этих показателей.

В-третьих, методика расчета надежности по своей сложности не должна превышать сложности технологических гидравлических расчетов и только тогда расчеты надежности войдут составной частью в технологические расчеты водопроводных сооружений.

В-четвертых, следует особое внимание уделить точности исходных статистических данных по надежности отдельных элементов водопроводных сооружений. В противном случае, точность значений надежности водопроводных сооружений и систем, полученных в результате расчетов, может быть сомнительной.

Целью данной работы есть изложение предложенного метода и, разработанной на его основе, методики расчета надежности систем производственного водоснабжения промышленных предприятий на примере системы оборотного водоснабжения металлургического, а именно – сталелитейного завода.

## ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

### Принципиальные схемы охладительных систем оборотного водоснабжения

В качестве охлаждающих сооружений в ОСОВ используют следующие сооружения:

- водохранилища (пруды) – охладители;
- брызгальные бассейны;
- градирни.

Для создания движения воды в оборотном цикле строят специальные циркуляционные насосные станции (ЦНС), которые могут иметь одну или две группы насосов. Схему ОСОВ с одной группой насосов охлажденной воды (НОВ) используют на тепловых и атомных электростанциях (рис. 1).

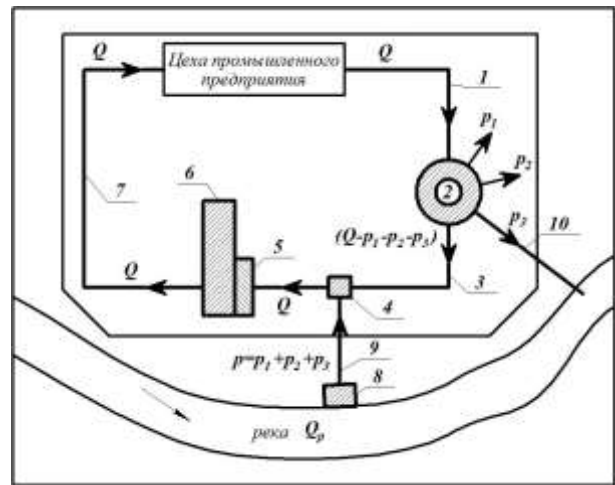


Рис. 1 Схема охладительной системы оборотного водоснабжения с одной группой насосов в циркуляционной насосной станции:

- 1 – напорный водовод нагретой воды;
- 2 – охладитель воды; 3 – самотечный водовод охлажденной воды; 4 – камера добавочной воды;
- 5 – камера охлажденной воды; 6 – циркуляционная насосная станция; 7 – напорный водовод охлажденной воды; 8 – водозабор и насосная станция добавочной воды; 9 – водовод добавочной воды; 10 – самотечный водовод продувочной воды;
- $p_1$  – потери воды на испарение;
- $p_2$  – потери воды на капельный унос;
- $p_3$  – потери воды на продувку системы оборотного водоснабжения

Fig. 1 Scheme of the cooling circulating water supply system with one group pumps in the circulation pumping station:

- 1 – penstock heated water; 2 – cooling tower;
- 3 – gravity conduit chilled water; 4 – camera make-up water; 5 – camera chilled water; 6 – circulating pumping station; 7 – penstock chilled water; 8 – water intake and pumping station of water added; 9 – conduit make-up water; 10 – gravity conduit blowdown water;
- $p_1$  – loss of water through evaporation;
- $p_2$  – loss of water droplet entrainment;
- $p_3$  – loss of water blowdown of circulating water supply system

На большинстве промышленных предприятий используют схему ОСОВ с двумя группами насосов в ЦНС. Группа насосов нагретой воды (ННВ) забирает воду из камеры нагретой воды (КНВ) и подает ее в охладитель. Затем охлажденную воду насосы охлажденной воды (НОВ) забирают из камеры охлажденной воды и подают ее в цеха промышленного предприятия (рис. 2).

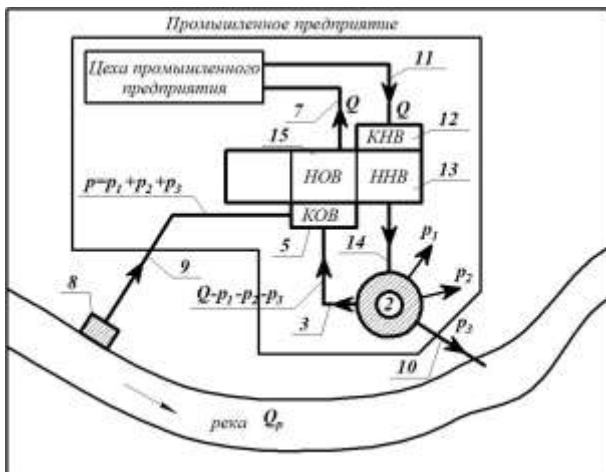


Рис. 2 Схема охладительной системы оборотного водоснабжения с двумя группами насосов в циркуляционной насосной станции:

- 11 – самотечный водовод нагретой воды;
- 12 – камера нагретой воды; 13 – группа насосов нагретой воды; 14 – напорный водовод нагретой воды; 15 – группа насосов охлажденной воды

Fig. 2 Scheme of the cooling circulating water supply system with two groups of pumps in the circulation pumping station:

- 11 – gravity conduit heated water; 12 – camera heated water; 13 – a group of pumps heated water;
- 14 – penstock heated water; 15 – a group of pumps chilled water

Анализ схем производственного водоснабжения показывает, что отдельные водопроводные сооружения образуют комплекс взаимодействующих и взаимосвязанных водой сооружений. С точки зрения надежности, эти сооружения образуют цепь последовательно соединенных восстанавливаемых элементов. Эту цепь сооружений можно построить как для прямоточных, так и для оборотных систем производственного водоснабжения. Сооружения охладительных систем оборотного водоснабжения с двумя группами насосов в циркуляционной насосной станции (рис. 2) могут быть представлены следующей цепочкой сооружений (рис. 3).

Поэтому, для оценивания надежности систем производственного водоснабжения нужно анализировать надежность цепи водопроводных сооружений по направлениям подачи воды отдельным потребителям (цехам).



Рис. 3 Цепь сооружений по направлению “ЦЕХ – ЦНС – ОХЛАДИТЕЛЬ – ЦНС – ЦЕХ”:

- В5С – самотечный водовод нагретой воды, обратный; В5Н – напорный водовод нагретой воды;
- В4С – самотечный водовод охлажденной воды, обратный; В4Н – напорный водовод охлажденной воды, подающий

Fig. 3 Chain structures in the direction of “WORKSHOP – CPS – COOLER – CPS – WORKSHOP”:

- B5C – gravity conduit heated water, reverse; B5H – penstock heated water; B4C – gravity conduit chilled water, reverse; B4H – penstock chilled water, supply; CPS – circulating pumping station

**Охладительные системы оборотного водоснабжения сталелитейных заводов**

Вода в металлургическом производстве используется в основном (70...75%) для охлаждения металлургических печей, что обеспечивает нормальный ход технологического процесса и стойкость деталей металлургических агрегатов, которые работают в зонах высоких температур. Обычно, при водяном охлаждении устраивают охладительную систему оборотного водоснабжения (ОСОВ), которая обеспечивает, с одной стороны эффективное охлаждение конструкций и деталей металлургических печей, а с другой – защиту поверхностных водных источников от загрязнения. При этом, вода используется повторно многократно, а из источника забирается свежая вода только для покрытия безвозвратных, для системы оборотного водоснабжения, потерь.

Процесс водяного охлаждения деталей металлургических агрегатов сводится к передаче тепла от нагретой стенки детали к холодной воде. При этом вода незначительно нагревается, но ее агрегатное состояние не изменяется. Охлаждение происходит за счет конвективного теплообмена, когда на смену нагретой воде поступает охлажденная вода. Таким образом, необходимость непрерывного движения воды ставит технологический агрегат в зависимость от надежности как ОСОВ, так и системы электроснабжения. Перерыв в подаче воды даже на несколько минут может привести к значительным авариям металлургических печей и больших материальных потерь, если не предусмотрены меры по повышению надежности.

Развитие электросталеплавильного производства обусловлено возможностью переработки до 100% металлолома, практически на месте его образования. В дуговых печах прямого действия [22] электрическая дуга горит между электродами и расплавленным металлом, непосредственно нагревая металл (рис. 4).

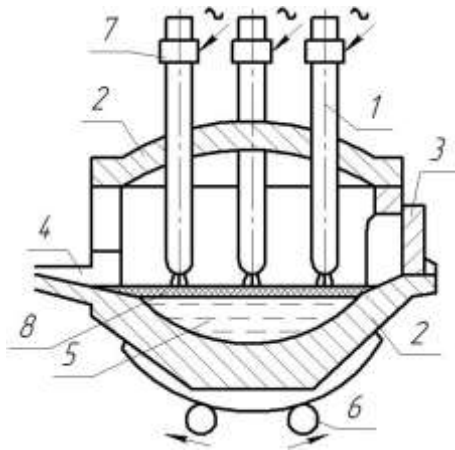


Рис. 4 Схема электрической дуговой печи прямого действия:

1 – электрод; 2 – свод; 3 – рабочая дверца;  
4 – лётка для выпуска жидкой стали; 5 – жидкая сталь; 6 – механизм наклона; 7 – электродержатель;  
8 – жидкий шлак

Fig. 4 Scheme electric arc furnace of direct action:

1 – electrode; 2 – set; 3 – working the door;  
4 – taphole for tapping molten steel; 5 – molten steel;  
6 – tilt mechanism; 7 – electrode; 8 – molten slag

Дуговая сталеплавильная электропечь (ДСП) предназначена для производства стали широкого сортамента из шихты, состоящей из подготовленного стального лома и необходимых добавок. Для примера, ДСП-50 (рис. 5) имеет [26] следующие технические параметры: номинальная емкость 50 т; мощность трансформатора 40 МВ·А; напряжение высокой стороны 35 кВ; напряжение низкой стороны 200...570 В; максимальный ток электрода 55 кА; число фаз – 3; частота тока 50 Гц; диаметр графитовых электродов 500 мм; рабочий ход электродов 3500 мм. По принципу действия электропечь принадлежит к трехфазным дуговым электропечаем прямого действия с зависимой электрической дугой.

Печь состоит из стального кожуха цилиндрической формы со сферическим днищем. В середине кожух имеет огнеупорную футеровку, а плавильное пространство закрывается сверху съемным сводом. Печь имеет рабочее окно и выпускное отверстие со сливным желобом. Нагрев и плавление стали осуществляется мощными электрическими дугами, которые горят между концами трех электродов и металлом, который находится в печи. Перед загрузкой печи свод поднимают вверх к консоли портала, а потом консоль портала со сводом и электродами поворачивают на 90° в сторону сливного желоба и печь загружают с помощью бады.

Система водяного охлаждения дуговой печи состоит из распределителей (коллекторов), сливных воронок и труб. Вода подается в нижнюю часть водяной рубашки, а отводится из самой высокой

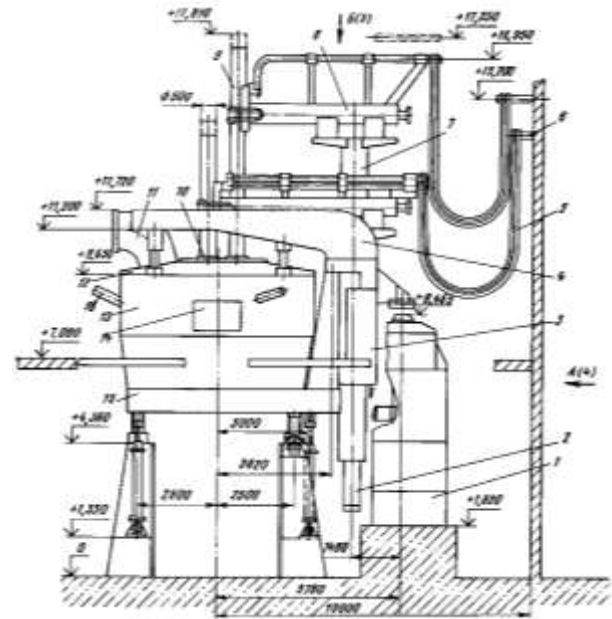


Рис. 5 Общий вид электропечи ДСП-50

1 – толкатель поворотный; 2 – подвеска портала; 3 – портал; 4 – консоль; 5 – установка кабельных гирлянд; 6 – мост; 7 – стойка; 8 – держатель электрода; 9 – электрод; 10 – уплотнение электродного отверстия; 11 – газоотсос; 12 – свод; 13 – кожух; 14 – рабочее окно; 15 – платформа наклоняющаяся

Fig. 5 General view of electric furnace DSP-50

1 – rotary pusher; 2 – suspension of the portal; 3 – the portal; 4 – console; 5 – installation of cable garlands; 6 – bridge; 7 – front; 8 – electrode holder; 9 – electrode; 10 – electrode seal holes; 11 – gas suction; 12 – set; 13 – casing; 14 – operating window; 15 – tilting platform

Оборотной водой охлаждаются следующие элементы дуговой электрической печи [17]: стеновые водоохлаждаемые панели (рис. 6); экономайзеры (холодильники) для уплотнения электродных отверстий; П-образная арка (рама) и заслонка загрузочного (рабочего) окна; кольцо свода; патрубок отведения дымовых газов; гибкие кабели вторичного токопровода; медные трубошины, которые подсоединены к головкам электроддержателей, которые зажимают электроды.

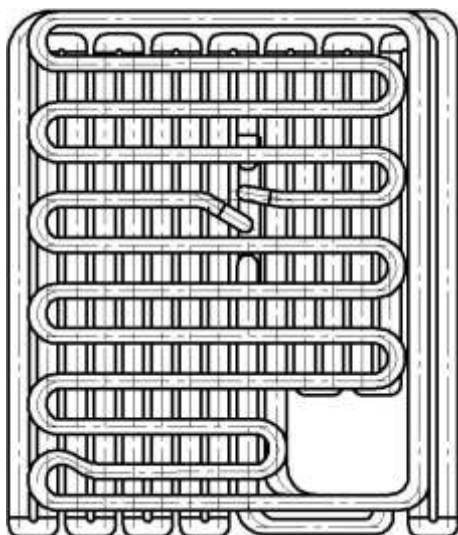


Рис. 6. Трубчатая водоохлаждаемая панель с фронтальным змеевиком

Fig. 6. Tubular water-cooled panel with front coil

**Выделение свойств надежности, которые анализируются**

Свойство сохраняемости не является определяющим, когда анализируется надежность функционирующей системы производственного водоснабжения. Это свойство является определяющим в том случае, когда рассматриваются изделия или объекты, которые находятся на хранении.

Свойство долговечности в данном случае не рассматривается в предположении, что элементы и сооружения системы производственного водоснабжения еще не достигли предельного состояния, когда дальнейшая их эксплуатация технически и экономически нецелесообразна. Предполагается, что установленная система технического обслуживания и ремонта позволяет поддерживать элементы и сооружения в работоспособном состоянии, а те из них, которые достигли предельного состояния, снимаются с эксплуатации и заменяются новыми.

Определяющими для функционирующих систем водоснабжения промышленных предприятий являются два свойства надежности – безотказность и ремонтпригодность. От этих свойств сооружений системы производственного водоснабжения напрямую зависит бесперебойность и восстанавливаемость водоснабжения отдельных цехов. Поэтому в данной работе предлагается метод и, разработанная на его основе, методика расчета безотказности и ремонтпригодности системы водоснабжения, которые определяют бесперебойность и восстанавливаемость водоснабжения как технологического процесса.

**Выбор основного и базисных показателей надежности**

Последствия отказов системы водоснабжения проявляются в виде ущербов, которые несут потребители воды в случае отказов системы водоснабжения. Характер зависимости этих ущербов от перерывов в снабжении водой определяются тем, какой фактор является доминирующим при определении последствий отказов. За счет инертности систем водоснабжения существует некоторый промежуток времени в течении которого последствия отказа у потребителя не ощущаются (это может быть несколько минут). Назовем это время перерыва в водоснабжении допустимым  $t_{доп}$  [12].

В сталелитейном производстве перерыв в подаче воды на время больше допустимого  $t_{доп}$  приводит к значительным материальным потерям. Однако, наличие структурного резерва – независимого трубопровода технической воды – позволяет выполнить переключение на резервный источник водоснабжения за время меньше допустимого  $t_{доп}$ . Поэтому, потребители воды в сталелитейном производстве оговаривают только частоту и продолжительность перерыва в подаче воды. Исходя из изложенного, целесообразно в качестве основного показателя надежности принять коэффициент готовности  $K_G$  или противоположный ему коэффициент простоя  $K_{П} = 1 - K_G$ . Коэффициент готовности  $K_G$  представляет собой “свертку” двух базисных показателей надежности – средней наработки на отказ  $T$  и среднего времени восстановления  $T_B$ :

$$K_G = \frac{T}{T + T_B}.$$

Коэффициент готовности – это комплексный показатель, который учитывает одновременно и безотказность (показатель  $T$ ), и ремонтпригодность (показатель  $T_B$ ) системы водоснабжения.

**Расчет надежности охладительных систем оборотного водоснабжения**

Цепь водопроводных сооружений и элементов на сталеплавильный цех представлена на рис. 7.

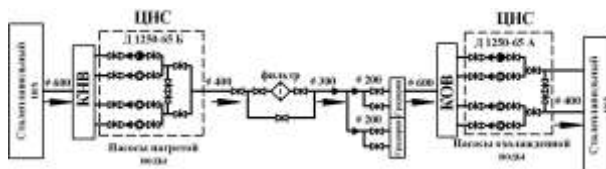


Рис. 7. Технологическая схема системы оборотного водоснабжения на сталеплавильный цех

Fig. 7. Technological scheme of circulating water supply system for steelmaking shop

Расчет безотказности выполняем путем вычисления параметра потока отказов  $\omega$  и обратной

величины – наработки на отказ  $T = 1/\omega$ . Параметр потока отказов трубопроводов и градирен вычисляем как для последовательно соединенных восстанавливаемых элементов. Параметр потока отказов ЦНС определяем методом “вкладов” [12]. Среднее время восстановления рассчитываем как средневзвешенную по вкладам величину.

Параметр потока отказов водопроводной сети на сталеплавильный цех:

$$\begin{aligned}\omega_c &= \omega_{0_{сн}} l_{сн} + \omega_{0_{сс}} l_{сс} + 8\omega_{зс} = \omega_{сн} + \omega_{сс} + 8\omega_{зс} = \\ &= 0,25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,368 + 0,011 \cdot 10^{-4} \cdot 0,409 + 8 \cdot 0,15 \cdot 10^{-4} = \\ &= 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час,}\end{aligned}$$

где:  $\omega_{0_{сн}} = 0,25 \cdot 10^{-4}$  1/час – удельный параметр потока отказов напорной сети [21];

$\omega_{0_{сс}} = 0,011 \cdot 10^{-4}$  1/час – удельный параметр потока отказов самотечной сети [9];

$l_{сн} = 0,368$  км;  $l_{сс} = 0,409$  км – длина, соответственно, напорной и самотечной сети;

$\omega_{сн}$ ,  $\omega_{сс}$ ,  $\omega_{зс}$  – параметр потока отказов, соответственно, напорной и самотечной водопроводной сети, сетевой задвижки ( $\omega_{зс} = 0,15 \cdot 10^{-4}$ , 1/час [10]).

Среднее время восстановления работоспособности водопроводной сети:

$$\begin{aligned}T_B &= \frac{\omega_{сн} T_{B_{сн}} + \omega_{сс} T_{B_{сс}} + 8\omega_{зс} T_{B_{зс}}}{\omega_{сн} + \omega_{сс} + 8\omega_{зс}} = \\ &= \frac{(0,25 \cdot 0,368 \cdot 8 + 0,011 \cdot 0,409 \cdot 8 + 8 \cdot 0,15 \cdot 10) \cdot 10^{-4}}{(0,25 \cdot 0,368 + 0,011 \cdot 0,409 + 8 \cdot 0,15) \cdot 10^{-4}} = \\ &= 9,8 \text{ час,}\end{aligned}$$

где:  $T_{B_{сн}}$ ,  $T_{B_{сс}}$ ,  $T_{B_{зс}}$  – среднее время восстановления, соответственно, напорной и самотечной водопроводной сети, сетевой задвижки [10].

Отказ фильтра не производит к отказу ОСОВ так как при его отказе закрываются две задвижки – перед фильтром и за ним, затем открывается задвижка на байпасной линии и вода движется в обход фильтра.

В летний жаркий период времени в работе должно находиться одновременно две градирни, поэтому, с точки зрения надежности, они соединены последовательно. Параметр потока отказов одной градирни  $\omega_2$  рассчитываем как для последовательно соединенных восстанавливаемых элементов:

$\omega_2 = \omega_6 + \omega_{6с} = (0,45 + 0,08) \cdot 10^{-4} = 0,53 \cdot 10^{-4}$ , 1/час, где:  $\omega_6$ ,  $\omega_{6с}$  – параметр потока отказов соответственно вентилятора и водораспределительной системы [15].

Тогда параметр потока отказов блока из 2-х градирен рассчитывается как сумма параметров потока отказов обеих градирен:  $\omega_{6с} = 2\omega_2 = 2 \cdot 0,53 \cdot 10^{-4} = 1,06 \cdot 10^{-4}$ , 1/час.

Наработка на отказ блока градирен:

$$T = \frac{1}{\omega_{6с}} = \frac{1}{1,06 \cdot 10^{-4}} = 9434 \text{ час.}$$

Технологическая схема обвязки насосных агрегатов ЦНС трубопроводами и арматурой приведен на рис. 8. Изначально, в ЦНС было предусмотрено 2 рабочих и 2 резервных насосных агрегата. Со временем производительность ОСОВ уменьшилась и сейчас в работе находится 1 рабочий и 3 резервных насосных агрегата. Расчет надежности ведем методом вкладов [12].

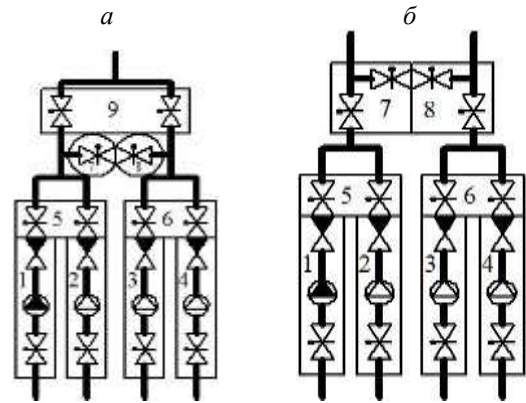


Рис. 8. Циркуляционная насосная станция: а – группа насосов нагретой воды; б – группа насосов охлажденной воды

Fig. 8. Circulation pumping station: а - a group of pumps heated water; б - a group of pumps chilled water

Параметр потока отказов укрупненных элементов группы насосов нагретой воды ЦНС:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_{зв} + \omega_n + \omega_k = \\ &= (0,1 + 1,25 + 0,08) \cdot 10^{-4} = 1,43 \cdot 10^{-4}, \text{ 1/час;}\end{aligned}$$

$$\omega_5 = \omega_6 = 2\omega_{зн} = 2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-4} = 1,2 \cdot 10^{-4}, \text{ 1/час;}$$

$$\omega_7 = \omega_8 = \omega_{знк} = 0,1 \cdot 10^{-4}, \text{ 1/час;}$$

$$\omega_9 = 2\omega_{знк} = 2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4} = 0,2 \cdot 10^{-4}, \text{ 1/час,}$$

где:  $\omega_{зв}$ ,  $\omega_n$ ,  $\omega_k$ ,  $\omega_{зн}$ ,  $\omega_{знк}$  – параметр потока отказов, соответственно, задвижки на всасывающей линии, насосного агрегата, обратного клапана, задвижки на напорной линии, задвижки на напорном коллекторе [12].

Вклады укрупненных элементов:

$$\begin{aligned}v_5 &= \omega_5 (\hat{E}_{i_6} + \hat{E}_{i_8}) = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (1,2 \cdot 10^{-3} + \\ &+ 0,2 \cdot 10^{-3}) = 1,68 \cdot 10^{-7}, \text{ 1/÷ ãñ,}\end{aligned}$$

$$\hat{E}_{i_6} \cong \omega_6 \hat{O}_{A_6} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 1,2 \cdot 10^{-3},$$

$$\hat{E}_{i_8} \cong \omega_8 \hat{O}_{A_8} = 0,1 \cdot 10^{-4} \cdot 20 = 0,2 \cdot 10^{-3},$$

$$\begin{aligned}v_6 &= \omega_6 (\hat{E}_{i_5} + \hat{E}_{i_7}) = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (1,2 \cdot 10^{-3} + \\ &+ 0,2 \cdot 10^{-3}) = 1,68 \cdot 10^{-7}, \text{ 1/÷ ãñ,}\end{aligned}$$

$$K_{П5} \cong \omega_5 T_{B5} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 1,2 \cdot 10^{-3};$$

$$K_{П7} \cong \omega_7 T_{B7} = 0,1 \cdot 10^{-4} \cdot 20 = 0,2 \cdot 10^{-3};$$

$$\nu_7 = \omega_7 K_{П6} = 0,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 0,12 \cdot 10^{-7}, 1/\div \text{ãñ};$$

$$\nu_8 = \omega_8 K_{П5} = 0,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 0,12 \cdot 10^{-7}, 1/\div \text{ãñ};$$

$$\nu_9 = \omega_9 = 0,2 \cdot 10^{-4}, 1/\div \text{ãñ}.$$

Параметр потока отказов группы насосов нагретой воды.

$$\omega_{ННВ} = \nu_5 + \nu_6 + \nu_7 + \nu_8 + \nu_9 = (1,68 + 1,68 + 0,12 + 0,12 + 200) \cdot 10^{-7} = 203,6 \cdot 10^{-7}, 1/\div \text{ãñ}.$$

Наработка на отказ группы насосов нагретой воды:

$$T = \frac{I}{\omega_{ННВ}} = \frac{1}{203,6 \cdot 10^{-7}} = 49116 \text{ час.}$$

Среднее время восстановления укрупненных элементов:

$$T_{B1} = T_{B2} = T_{B3} = T_{B4} =$$

$$= \frac{\omega_{36} T_{B36} + \omega_{Н} T_{BН} + \omega_{К} T_{BК}}{\omega_{36} + \omega_{Н} + \omega_{К}} =$$

$$= \frac{(0,1 \cdot 20 + 1,25 \cdot 60 + 0,08 \cdot 10) \cdot 10^{-4}}{(0,1 + 1,25 + 0,08) \cdot 10^{-4}} = 54,4 \text{ час.}$$

$$T_{B5} = T_{B6} = T_{B9} = T_{B3Н} = 10 \text{ час;}$$

$$T_{B7} = T_{B8} = T_{B3НК} = 20 \text{ час,}$$

где:  $T_{B36}$ ,  $T_{BН}$ ,  $T_{BК}$ ,  $T_{B3Н}$ ,  $T_{B3НК}$  – среднее время восстановления задвижки на всасывающей линии, насосного агрегата, обратного клапана, задвижки на напорной линии, задвижки на напорном коллекторе [12].

Среднее время восстановления группы насосов нагретой воды:

$$T_B = \frac{\nu_5 T_{B5} + \nu_6 T_{B6} + \nu_7 T_{B7} + \nu_8 T_{B8} + \nu_9 T_{B9}}{\omega_{ННВ}} =$$

$$= \frac{(1,68 \cdot 10 + 1,68 \cdot 10 + 0,12 \cdot 20 + 0,12 \cdot 20 + \dots + 200 \cdot 10) \cdot 10^{-7}}{203,6 \cdot 10^{-7}} = 10,0 \text{ час.}$$

Параметр потока отказов укрупненных элементов группы насосов охлажденной воды:

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_{\text{çä}} + \omega_i + \omega_e =$$

$$= (0,1 + 1,25 + 0,08) \cdot 10^{-4} = 1,43 \cdot 10^{-4}, 1/\div \text{ãñ},$$

$$\omega_5 = \omega_6 = 2 \omega_{\text{çé}} = 2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-4} = 1,2 \cdot 10^{-4}, 1/\div \text{ãñ},$$

$$\omega_7 = \omega_8 = 2 \omega_{\text{çéé}} = 2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4} = 0,2 \cdot 10^{-4}, 1/\div \text{ãñ}.$$

Вклады укрупненных элементов:

$$\nu_5 = \omega_5 (\hat{E}_{i_6} + \hat{E}_{i_8}) = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (1,2 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 10^{-3}) = 1,92 \cdot 10^{-7}, 1/\div \text{ãñ},$$

$$\hat{E}_{i_6} \cong \omega_6 \hat{O}_{A_6} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 1,2 \cdot 10^{-3},$$

$$\hat{E}_{i_8} \cong \omega_8 \hat{O}_{A_8} = 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 20 = 0,4 \cdot 10^{-3},$$

$$\nu_6 = \omega_6 \hat{E}_{i_5} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 1,44 \cdot 10^{-7}, 1/\div \text{ãñ},$$

$$\nu_7 = \omega_7 = 0,2 \cdot 10^{-4}, 1/\div \text{ãñ},$$

$$\hat{E}_{i_5} \cong \omega_5 \hat{O}_{A_5} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 1,2 \cdot 10^{-3},$$

$$\nu_8 = \omega_8 \hat{E}_{i_5} = 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 2,4 \cdot 10^{-7}, 1/\div \text{ãñ}.$$

Параметр потока отказов группы насосов охлажденной воды.

$$\omega_{НОВ} = \nu_5 + \nu_6 + \nu_7 + \nu_8 =$$

$$= (1,92 + 1,44 + 200 + 2,4) \cdot 10^{-7} = 205,76 \cdot 10^{-7}, 1/\div \text{ãñ}.$$

Наработка на отказ группы насосов охлажденной воды:

$$T = \frac{I}{\omega_{НОВ}} = \frac{1}{205,76 \cdot 10^{-7}} = 48600 \text{ час.}$$

Среднее время восстановления укрупненных элементов:

$$T_{B1} = T_{B2} = T_{B3} = T_{B4} =$$

$$= \frac{\omega_{36} T_{B36} + \omega_{Н} T_{BН} + \omega_{К} T_{BК}}{\omega_{36} + \omega_{Н} + \omega_{К}} =$$

$$= \frac{(0,1 \cdot 20 + 1,25 \cdot 60 + 0,08 \cdot 10) \cdot 10^{-4}}{(0,1 + 1,25 + 0,08) \cdot 10^{-4}} = 54,4 \text{ час;}$$

$$T_{B5} = T_{B6} = T_{B3Н} = 10 \text{ час;}$$

$$T_{B7} = T_{B8} = T_{B3НК} = 20 \text{ час.}$$

Среднее время восстановления группы насосов охлажденной воды:

$$T_{ВНОВ} = \frac{\nu_5 T_{B5} + \nu_6 T_{B6} + \nu_7 T_{B7} + \nu_8 T_{B8}}{\omega_{НОВ}} =$$

$$= \frac{(1,92 \cdot 10 + 1,44 \cdot 10 + 200 \cdot 20 + 2,4 \cdot 20) \cdot 10^{-7}}{205,76 \cdot 10^{-7}} =$$

$$= 19,8 \text{ час.}$$

Параметр потока отказов ОСОВ на сталеплавильный цех (СПЦ):

$$\omega_{СПЦ} = \omega_c + \omega_{\text{бэ}} + \omega_{ННВ} + \omega_{НОВ} + \omega_{КНВ} + \omega_{КОВ} =$$

$$= (1,3 + 1,06 + 0,2036 + 0,20576 + 0,03 + 0,03) \cdot 10^{-4} =$$

$$= 2,38 \cdot 10^{-4} 1/\div \text{ãñ},$$

где:  $\omega_{КНВ}$ ,  $\omega_{КОВ}$  – параметр потока отказов соответственно камеры нагретой воды и камеры охлажденной воды [10].

Наработка на отказ ОСОВ на СПЦ:

$$T = \frac{I}{\omega_{СПЦ}} = \frac{1}{2,38 \cdot 10^{-4}} = 4202 \text{ час} \approx 0,5 \text{ года.}$$

Среднее время восстановления работоспособности ОСОВ на СПЦ:

$$T_B = \frac{\omega_c T_{Bc} + \omega_{\text{бэ}} T_{B\text{бэ}} + \omega_{ННВ} T_{BННВ} + \dots}{\omega_c + \omega_{\text{бэ}} + \omega_{ННВ} + \dots} =$$

$$\frac{\dots + \omega_{НОВ} T_{BНОВ} + \omega_{КНВ} T_{BКНВ} + \omega_{КОВ} T_{BКОВ}}{\dots + \omega_{НОВ} + \omega_{КНВ} + \omega_{КОВ}} =$$

$$= \frac{(1,3 \cdot 9,8 + 1,06 \cdot 8 + 0,2036 \cdot 10 + 0,20576 \cdot 19,8 + \dots)}{(1,3 + 1,06 + 0,2036 + 0,20576 + \dots)} =$$

$$\frac{\dots + 2 \cdot 0,03 \cdot 25) \cdot 10^{-4}}{+ 2 \cdot 0,03) \cdot 10^{-4}} = 10,3 \text{ час.}$$

Коэффициент готовности ОСОВ на СПЦ:

$$K_{Г} = \frac{T}{T + T_{В}} = \frac{4201,7}{4201,7 + 10,3} = 0,99755.$$

Коэффициент простоя ОСОВ на СПЦ:

$$K_{П} = 1 - K_{Г} = 1 - 0,99755 = 0,00245.$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Н.Н., 1982. Водоснабжение: [учебник]. – М.: Стройиздат. – 440 с.
2. Андоньев С.М., 1970. Испарительное охлаждение металлургических печей. – М.: Металлургия. – 424 с.
3. Вахлер Б.Л., 1977. Водоснабжение и водоотведение на металлургических предприятиях: Справочник. – М.: Металлургия. – 320 с.
4. Вахлер Б.Л., 1968. Оборудование насосных и воздушных станций металлургических заводов. – М.: Металлургия. – 276 с.
5. Водное хозяйство заводов черной металлургии., 1973 / Сериков Н.Ф., Красавцев Г.Н., Ильичев Ю.И. и др. – М.: Металлургия. – 405 с.
6. Водоподготовка промышленных предприятий., 1980 / Семенюк В.Д., Евстратов В.Н., Киевский М.И., Пазюра В.С., Копейка В.И. – К.: Техніка. – 119 с.
7. Гладков В.А., Арефьев Ю.И., Пономаренко В.С., 1976. Вентиляторные градирни. – М.: Стройиздат. – 216 с.
8. Гончаров В.В., 1989. Брызгальные водоохладители ТЭС и АЭС. – Л.: Энергоатомиздат. – 140 с.
9. Игнатчик С.Ю. Расчет надежности, безопасности и инвестиционной эффективности сети водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. №12. С. 57-67
10. Ильин Ю.А., 1985. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат. 240 с.
11. Кучеренко Д.И., Гладков В.А., 1980. Обратное водоснабжение: (Системы водяного охлаждения). – М.: Стройиздат. – 168 с.
12. Новохатний В.Г., 2012. Надійність функціонування подавально-розподільного комплексу систем водопостачання: автореф. дис. д-ра техн. наук. – К.: КНУБА. – 32 с.
13. Новохатний В., Костенко С. Надежность водоводов систем водоснабжения // Motrol. Commission of Motorization and energetic in agriculture. – 2013, Vol. 15, №6. – Lublin – Rzeszow. – p. 101 – 108.
14. Обработка воды на тепловых электростанциях. Под ред. чл.-кор. АН СССР В.А. Голубцова., 1966. – М.: Энергия. – 448 с.
15. Пономаренко В.С. Оценка надежности градирен // Водоснабжение и санитарная техника. – 1997. - №6. – С. 13 – 16.
16. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84), 1989. – М.: ЦИТП Госстроя СССР. – 190 с.
17. Смирнов А.Н., Сафонов В.М., Дорохова Л.В., Цупрун А.Ю., 2005. Металлургические мини-заводы. – Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т. – 469 с.
18. Тебенихин Е.Ф., Гусев Б.Т., 1970. Обработка воды магнитным полем в теплоэнергетике. – М.: Энергия. – 144с.
19. Укрупненные нормы водопотребления и водоотведения для различных отраслей промышленности., 1978 / Совет Эконом. Взаимопомощи, ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. – М.: Стройиздат. – 590 с.
20. Фарфоровский Б.С., Фарфоровский В.Б., 1972. Охладители циркуляционной воды тепловых электростанций. – Л.: Энергия. – 111 с.
21. Храменков С.В., 2005. Стратегия модернизации водопроводной сети. – М.: Стройиздат. 400 с.
22. Храпко С.А., 2007. Производство стали в ДСП (конспект лекций). – Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т. – [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://uas.su/books/2011/dps/dps.php>
23. Шабалин А.Ф., 1972. Обратное водоснабжение промышленных предприятий. – М.: Стройиздат. – 296 с.
24. Шабалин А.Ф., 1972. Эксплуатация промышленных водопроводов. – М.: Металлургия. – 499 с.
25. Шабалин А.Ф., 1968. Очистка и использование сточных вод на предприятиях черной металлургии. – М.: Металлургия. – 489 с.
26. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.laborant.ru/eltech/12/4/0/06-95.htm>

## RELIABILITY OF COOLING CIRCULATING WATER SUPPLY SYSTEMS

Valeriy Novokhatniy, Sergey Kostenko

**Summary.** Developed method and gives examples of calculating the reliability of cooling circulating water supply systems for metallurgical example steelworks. The possibility of calculating the reliability of the water supply complex, which includes a circulating pump station, cooling towers, pressure and gravity water networks.

**Key words:** cooling circulating water supply systems, reliability.