

ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТЕПЛОСЕТИ В УСЛОВИЯХ ЕЁ АВАРИЙНОЙ ПОДПИТКИ

БАРОЧКИН Е.В., канд. техн. наук, ШАТОВА И.А., инж., ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В. студ.

Рассматриваются особенности водно-химического режима тепловой сети при её аварийной подпитке необработанной водой. Установлена возможность нарушения при этом норм качества сетевой воды в течение времени, превышающего разрешенное руководящими документами. Предложена методика расчета послеаварийной нормализации водно-химического режима и показана необходимость применения для аварийной подпитки химочищенной воды.

Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (от 21.07.1997 г., № 116-ФЗ) относит тепловые сети к опасным производственным объектам и требует выполнения правил промышленной безопасности. В частности, предписано выполнение норм в области защиты населения и территорий, например, от чрезвычайных ситуаций.

На основании статьи 9 указанного закона организация, эксплуатирующая опасный производственный объект, обязана, в числе прочего, осуществлять мероприятия по локализации и ликвидации последствий аварии. С этой целью статья 10 требует планировать и осуществлять эти мероприятия.

Инструкция по расследованию и учету технологических нарушений в работе энергосистем, электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей (РД 34.20.801-2000, Министерство энергетики Российской Федерации, РАО «ЕЭС России») конкретизирует признаки технологических нарушений (п. 2), в частности:

- аварией являются:

- повреждение энергетического котла (водогрейного котла с производительностью более 50 Гкал/ч) с разрушением, деформацией или смещением элементов каркаса, барабана, главных паропроводов, если оно привело к вынужденному простоя котла в ремонте сроком более 25 суток;

- повреждение магистрального трубопровода тепловой сети в период отопительного сезона, если это привело к перерыву теплоснабжения потребителей на срок 36 ч и более;

- инцидент – отказ или повреждение технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, отклонение от режима технологического процесса, нарушение положений названного Федерального закона, других федеральных законов и иных нормативных правовых актов Российской Федерации, а также нормативных технических документов, устанавливающих правила ведения работ на опасном производственном объекте (если они не содержат признаков аварии).

Инцидентом являются, например:

- нарушение договорных обязательств по отношению к потребителям из-за полного или частичного прекращения производства тепловой энергии;

- повреждение оборудования тепловых сетей;

- отключение оборудования тепловой сети, котельной из-за недопустимых отклонений технологических параметров.

Нарушение водно-химического режима тепловой сети выражается в отклонении химических показателей качества сетевой воды от установленных норм. Они приводят к усилению внутренней коррозии, образованию накипи в водогрейном оборудовании, отложений шлама в трубопроводах, к бактериальному заражению сетевой воды.

Статистические данные о повреждениях водогрейного оборудования и тепловых сетей, собранные АО «Фирма ОРГРЭС», свидетельствуют о том, что вследствие нарушений водно-химического режима наиболее вероятны инциденты, но не аварии. В частности, внутренняя коррозия может привести к появлению свищей и даже к разрыву трубопровода и, как следствие, к росту утечек воды, требующих компенсации.

Федеральный закон и указанная выше инструкция в качестве аварии рассматривают лишь повреждение магистрального трубопровода, которое приводит к перерыву теплоснабжения на срок не менее 36 ч. Таким образом, к аварии приводит существенное повреждение магистрального трубопровода, при котором утечка теплоносителя является фактически не компенсируемой, т.е. превышающей сумму нормативных утечек (0,75 % от объема закрытых тепловых сетей) и дополнительной аварийной подпитки нехимочищенной и недеаэрированной водой (2 % от того же объема), указанных в СНиП 41-02-2003 «Тепловые сети». При такой аварийной утечке требуется неотложное отключение поврежденного участка.

Таким образом, нормируя аварийную подпитку, составители СНиП имели в виду инцидентную подпитку (в терминологии названных выше документов), которая полностью или в значительной степени компенсирует инцидентную утечку воды при повреждении элементов

теплосети. Именно эта подпитка в настоящей статье называется аварийной подпиткой.

Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок, правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов и другие нормативные документы устанавливают требования к качеству подпиточной и сетевой воды.

Естественно, при аварийной подпитке, вообще, и при аварийной подпитке необработанной водой, в первую очередь, происходит загрязнение сетевой воды. При этом нарушаются нормативные требования к качеству сетевой воды по её жесткости, pH_{25} , карбонатному индексу, содержанию кислорода, взвешенных веществ, продуктов коррозии, по прозрачности воды. В закрытую теплосеть поступает большое количество подпиточной воды, содержащей органику, и, следовательно, становится возможной вспышка жизнедеятельности сульфатовосстанавливающих бактерий, микробиологическая и сероводородная коррозия.

Степень загрязненности сетевой воды при аварийной подпитке теплосети пропорциональна времени этой подпитки и увеличивается с удалением места аварийной утечки от места аварийной подпитки.

Основной нормативный документ, регламентирующий главные параметры эксплуатационных режимов, Правила технической эксплуатации (ПТЭ) электрических станций и сетей Российской Федерации, допускает временное ухудшение качества сетевой воды в начале отопительного сезона (т.е. фактически в послеремонтный период) и в послеремонтный период в течение двух недель для открытых и четырех недель для закрытых систем теплоснабжения, но только по трем параметрам качества сетевой воды: по содержанию соединений железа – до $1,0 \text{ мг/дм}^3$ (двукратное превышение ПДК), по содержанию растворенного кислорода – до 30 мкг/дм^3 (полторакартное превышение ПДК), по содержанию взвешенных веществ – до 15 мг/дм^3 (трехкратное превышение ПДК). Для закрытых тепловых сетей разрешено, тем самым, двукратное превышение предельно допустимого содержания соединений железа, полторакартное – кислорода и трехкратное – взвешенных веществ. Для открытых систем теплоснабжения дополнительно по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы допускается двухнедельное превышение норм цветности и содержания соединений железа. Не регламентируются допустимые величина и длительность нарушения норм по другим параметрам (pH_{25} , содержание свободной угольной кислоты, карбонатный индекс, содержание нефтепродуктов). Отсутствие регламентации не означает, что эти нарушения допустимы. Напротив, исходя из российской практики применения нормативных документов, следует заклю-

чить, что нарушение по данным параметрам норм качества сетевой воды, установленных для периода нормальной работы теплосети, недопустимо. Например, в ПТЭ указано, что при превышении допустимого значения жесткости питательной воды паровых котлов существенно ограничено время их работы. Аналогичные ограничения введены нормативными документами США, Германии и др.

В условиях тепловых сетей приоритет в нормировании не принадлежит ограничению содержания кислорода. Ограничение отпуска тепла более вероятно при усилении накипеобразования, а не коррозии. В этой связи для водогрейных котлов должны быть введены ограничения на длительность работы с нарушенным нормативом по карбонатному индексу или карбонатной жесткости. Можно полагать, что безусловное нормирование карбонатного индекса сетевой воды в зависимости от температуры её нагрева и pH_{25} является скрытой формой ограничения длительности работы в условиях нарушения норматива карбонатной жесткости: работа в этих условиях не допускается, при появлении нарушения требуется немедленное его устранение, например, за счет снижения температуры нагрева воды. Однако в условиях самого холодного месяца это ограничение слишком сурово. Требуется обоснование допустимой величины и времени нарушений.

Аварийная подпитка является предремонтной и ремонтной. Таким образом, после её прекращения должны быть, по крайней мере, соблюдены требования к качеству сетевой воды, установленные в ПТЭ для начала отопительного сезона и послеремонтного периода.

Наиболее затруднена послеаварийная нормализация водно-химического режима закрытых тепловых сетей. По окончании аварийного ремонта восстанавливаются нормативные утечка воды и подпитка теплосети. Кратность водообмена резко снижается, ухудшаются условия для вывода из теплосети примесей сетевой воды, поступающих в неё при аварийной подпитке и аварийном ремонте. Оценка времени снижения содержания примеси в сетевой воде при нормативной величине нормальной (неаварийной) подпитки показывает, что это время может значительно превышать установленные в ПТЭ две-четыре недели.

Если существует такая, значит следует проблема. Следует либо разработать технологию аварийной подпитки, снижающую степень и длительность загрязнения сетевой воды при этой подпитке, либо получить разрешение компетентных органов на длительную послеаварийную работу теплосети с ухудшенным качеством сетевой воды.

Запас подпиточной воды в баках-аккумуляторах может быть использован для подпитки закрытой теплосети при инцидентах.

Для такой аварийной подпитки теплосети в соответствии с указаниями СНиП следует использовать недеаэрированную и химически необработанную воду.

Целесообразность применения во всех случаях для аварийной подпитки химически необработанной воды вызывает сомнение. С одной стороны, действительно, необработанная вода имеет меньшую стоимость, что сокращает аварийные издержки, и не все системы теплоснабжения располагают мощными водоподготовительными установками. С другой стороны:

- подача больших количеств жесткой подпиточной воды в сеть может привести к существенному увеличению жесткости сетевой воды и либо к ограничению температуры нагрева сетевой воды, либо к усиленному накипеобразованию в водогрейных котлах и сетевых подогревателях. Теплосеть при аварийной подпитке жесткой водой зашламляется. При этом после завершения аварийного ремонта при этом длительное время будет наблюдаться нарушение норм качества сетевой воды по жесткости, содержанию взвешенных веществ и по pH₂₅;

- подача больших количеств умягченной подпиточной, но не деаэрированной воды в сеть приводит к усилению внутренней коррозии и образованию её продуктов. Следует иметь в виду, что альтернативно низкая коррозия при аварийной подпитке жесткой водой не достигается. Для этого требуется длительное использование жесткой воды: процесс «самоингибирования» стали при кислородной коррозии в жесткой воде приводит к положительному результату не ранее, чем через две – три недели.

Ниже приводятся оценки негативных технологических последствий подпитки теплосети недеаэрированной жесткой водой в условиях зимы для г. Череповца и оценка коррозионных потерь.

Результаты расчетов накипеобразования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Скорость карбонатного накипеобразования в трубах водогрейного оборудования

Температура нагрева сетевой воды, t, °C	Карбонатная жесткость сетевой воды (Жк) и скорость карбонатного накипеобразования (г/м ² ч)			
	1,0	1,5	2,0	3,0
Водогрейные котлы				
100	0,033	0,092	0,267	2,18
115	0,045	0,148	0,500	5,60
130	0,061	0,246	0,940	14,42
150	0,093	0,451	2,18	50,8
200	0,267	2,18	17,79	1186
Сетевые подогреватели				
	1,0	1,5	2,0	3,0
100	0,0056	0,021	0,077	1,07
115	0,0084	0,0372	0,169	3,49
130	0,0124	0,0676	0,373	11,31
150	0,021	0,149	1,068	55,2
200	0,077	1,07	14,82	2852

Скорость карбонатного накипеобразования (г/м²ч) определена по формулам [1] при отсутствии кипения в трубах:

$v_n = 0,0004 \exp(0,0263J_k t)$ - для сетевых подогревателей с латунными трубками;

$v_n = 0,004 \exp(0,021J_k t)$ - для водогрейных котлов с теплообменными трубами из углеродистой стали.

Результаты расчетов по этим формулам согласуются с определением предельно допустимого значения карбонатного индекса.

Карбонатное накипеобразование приводит к росту температуры стенок труб со скоростью, рассчитанной по формуле (град/ч)

$$v_t = 10^{-3} \frac{v_n q}{\rho \lambda}$$

где ρ – плотность карбонатной накипи, кг/м³; q – плотность теплового потока, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности карбонатной накипи, Вт/(м °C).

В расчетах принято: $\rho = 2000$ кг/м³; $q = 25000$ Вт/м² – для сетевых подогревателей; $q = 400000$ Вт/м² – для водогрейных котлов (локальное значение); $\lambda = 0,86$ Вт/(м °C).

Результаты расчета скорости роста температуры приведены в табл. 2.

Таблица 2. Скорость роста температуры стенок труб водогрейного оборудования

Температура нагрева сетевой воды, t, °C	Карбонатная жесткость сетевой воды (Жк) и скорость роста температуры стенок труб (град/ч)			
	1,0	1,5	2,0	3,0
Водогрейные котлы				
100	0,0077	0,021	0,267	0,51
115	0,0105	0,034	0,500	1,30
130	0,014	0,057	0,940	3,35
150	0,022	0,105	2,18	11,8
200	0,062	0,507	17,79	276
Сетевые подогреватели				
	1,0	1,5	2,0	3,0
100	0	0	0,001	0,016
115	0	0	0,002	0,05
130	0	0,001	0,005	0,17
150	0	0,002	0,016	0,80
200	0,001	0,016	0,22	41

Из результатов расчетов (табл. 1, 2) следует, что в условиях г. Череповца (р. Шексна) скорости карбонатного накипеобразования и роста температуры, опасные по условию перегрева труб поверхностей нагрева, достигаются для водогрейных котлов лишь при зимней аварийной подпитке теплосети сырой некоагулированной водопроводной водой (жесткость карбонатная до 2 мг-экв/дм³ - максимально возможное значение). Как правило, водопроводная вода для г. Череповца получена путем коагуляции и механического осветления. Ее зимняя карбонатная жесткость находится на уровне 0,9–1,2 мг-экв/дм³, что исключает опасный рост температуры стенок труб

котла вследствие карбонатного накипеобразования.

Предельно допустимая температура стенок латунных трубок сетевых подогревателей равна 200 °С. Опасный рост температуры этих трубок не достигается за время аварийной подпитки даже при аварийной подпитке теплосети некоагулированной водой р. Шексны. Высокий (относительно) подъем температуры стенок латунных трубок возможен уже за пределами времени аварийной подпитки при первичном и вторичном накипеобразовании (при кипении карбонатного и железистого шлама), (табл. 3). Действительно, нарушение норм качества сетевой воды в течение четырех недель разрешено по содержанию соединений железа (до 1 мг/дм³) и взвешенных веществ (до 15 мг/дм³). Реальное загрязнение сетевой воды при аварийной подпитке превышает, как правило, разрешенное.

Таблица 3. Расчетный прирост температуры стенок труб вследствие карбонатного накипеобразования в течение четырех недель

Температура нагрева сетевой воды, t, °С	Карбонатная жесткость сетевой воды (Ж _к) и прирост температуры стенок труб (°С)			
	1,0	1,5	2,0	3,0
Водогрейные котлы				
100	5,2	14	42	342
115	7	23	81	874
130	9	38	148	*
150	15	71	343	*
200	42	340	*	*
Сетевые подогреватели				
	1,0	1,5	2,0	3,0
100	0	0	1	10,8
115	0	0	1	33,6
130	0	1	3	114
150	0	1	11	*
200	1	11	148	*

* **Примечание.** Физический смысл расчета отсутствует.

Таким образом, при нормальной работе очистных водопроводных сооружений г. Череповца аварийная подпитка теплосети неумягченной водой допустима по условию надежности водогрейных котлов и сетевых подогревателей, работающих при отсутствии кипения в трубах поверхностей нагрева.

Накипеобразование и рост температуры стенок труб водогрейного котла с недопустимо высокими скоростями возможны при нарушениях циркуляции и при недопустимом понижении давления воды в выходном коллекторе котла. В последнем случае инструкция по эксплуатации водогрейных котлов требует их останова.

Количество шлама (г), который может образоваться в теплосети при ее аварийной подпитке неумягченной водой (максимальная оценка), составляет для условий г. Череповца

$$G_{\text{ш}} = J_{\text{к}} D_{\text{а}} \tau_{\text{а}} \Theta = 1 \cdot 800 \cdot 40 \cdot 50 = 1600000 \text{ г,}$$

где $J_{\text{к}} = 1 \text{ мг экв/дм}^3$ – карбонатная жесткость сырой водопроводной воды; $D_{\text{а}} = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ – расход воды при аварийной подпитке (принят); $\tau_{\text{а}} = 40 \text{ ч}$ – длительность аварийной подпитки (принята); $\Theta = 50 \text{ г/г-экв}$ – молярная масса эквивалента CaCO_3 (принято условно, что соли карбонатной жесткости полностью превращаются в карбонат кальция).

В пересчете на 1 м³ воды теплосети с объемом 30000 м³ максимальное удельное шламообразование составит 53 г/м³. Если предположить десятикратное концентрирование шлама в зонах с малой скоростью циркуляции по отношению к трубопроводам, то содержание шлама в воде этих зон можно оценить на уровне 530 г/м³. При полном осаждении шлама в трубах этих зон при внутреннем диаметре, равном 20 мм, увеличение их удельной загрязненности составит 3,2 г/м³, т.е. пренебрежимо мало. Данная оценка учитывает лишь осаждение собственного шлама, заключенного в воде этих зон, и не учитывает его поступление с водой из других зон.

Таким образом, при аварийной подпитке теплосети неумягченной водой следует учитывать ухудшение качества воды: содержание взвешенных веществ в сетевой воде может превысить нормативное в 4 - 100 раз.

При этом увеличивается и содержание свободной углекислоты в воде в пределах до 10 – 26 мг/дм³ при карбонатной жесткости подпиточной воды 1,2 мг-экв/дм³.

При аварийной подпитке систем теплоснабжения недеаэрированной водой увеличивается скорость внутренней коррозии ее трубопроводов и оборудования. При содержании в воде кислорода около 6 мг/дм³ скорость коррозии стали не менее 1 г/(м² ч) (при температуре около 40 °С) и повышается с ростом температуры и скорости движущейся воды [2].

Если предположить полное расходование в коррозионных процессах кислорода, попавшего в систему, то максимальная концентрация продуктов коррозии в пересчете на Fe составит в условиях г. Череповца около 18 мг/дм³. Фактическое содержание кислорода в воде разных зон системы будет отличаться от его содержания в воде аварийной подпитки. И содержание поступивших продуктов коррозии будет меньше 18 мг/дм³, однако оно существенно будет превышать допустимое (1,0 и 0,5 мг/дм³). Усредненное проникновение кислородной коррозии за 40 ч составит 5 мкм, но местное, определенное с учетом степени локализации коррозии, равной 10, составит 0,05 мм. В длительной перспективе ущерб будет еще больше из-за подшламовой коррозии.

Расчетные оценки показывают, что повреждаемость оборудования системы теплоснабжения г. Череповца за время аварийной подпитки невелика и может не приниматься во внима-

ние. В ближней перспективе более важен учет значительного ухудшения качества сетевой воды по содержанию кислорода, по рН₂₅ воды и по содержанию в ней взвешенных веществ и продуктов коррозии.

Для длительной перспективы следует учитывать послеаварийные негативные процессы (коррозию, накипеобразование), вызванные ухудшением качества сетевой воды. Для их исключения требуется послеаварийная нормализация водно-химического режима теплосети.

После аварийной подпитки необработанной водой значение рН₂₅ сетевой воды будет резко снижено из-за поступления в систему теплоснабжения недеаэрированной воды и из-за термолиза бикарбонатов кальция и магния.

Кроме того, массовое поступление в систему водопроводной воды, не освобожденной полностью от органики, приведет к вспышке жизнедеятельности сульфатовосстанавливающих бактерий и, как следствие, к появлению на длительное время сероводородной коррозии и мути сульфидов железа в воде.

После ликвидации аварийной (инцидентной) течи и восстановления нормативного значения подпитки системы будет протекать процесс самоочистки сетевой воды вследствие «самопродувки» с утечками, расходования примесей в химических реакциях и осаждения их продуктов.

Длительность процесса очистки путем «самопродувки» (или продувки при дренировании) в разных участках системы различна. В среднем ее можно оценить по формуле

$$\tau = \frac{V}{D} \ln \left(\frac{C_0 - C_n}{C - C_n} \right),$$

где τ - время уменьшения концентрации примеси от C_0 до C ; V - объем воды в системе, м³; D - подпитка системы, м³/ч; C_0 и C - содержание примеси в сетевой воде по окончании аварийной подпитки и через время τ , мг/дм³; C_n - содержание примеси в подпиточной воде, мг/дм³.

Эта формула не учитывает вывод примеси из воды вследствие химических реакций и осаждения, т.е. дает завышенную оценку времени самоочистки. Точное расчетное определение этого времени для примесей, участвующих в реакциях и в осаждении, невозможно, т.е. требует знания эмпирических констант для конкретной системы.

Ориентировочная оценка времени снижения карбонатной жесткости воды без учета термолиза и перехода бикарбонатов в карбонат составит:

- при подпитке 80 м³/ч:

$$\tau = \frac{25000}{80} \ln \frac{1,2 - 0,15}{0,3 - 0,15} = 608 \text{ ч;}$$

- при подпитке 200 м³/ч – 243 ч;
- при подпитке 800 м³/ч – 61 ч.

Расчет времени нормализации содержания кислорода в сетевой воде можно выполнить по формуле

$$\tau = \frac{V}{D + kS} \ln \frac{C_0 - C_n}{C - C_n},$$

где k – условная константа скорости кислородной коррозии, м/ч; S – площадь корродирующей поверхности, м².

Кислород участвует в катодных реакциях, протекающих на большей части внутренней поверхности теплосети. Значение k можно принять, используя данные [2], равным отношению массовой скорости кислородной коррозии к концентрации кислорода: $k = 0,17$ м/ч.

Выполненные расчеты показывают, что время нормализации содержания кислорода мало и определяется не водообменом, а скоростью коррозии. Например, при $S = 120\,000$ м² оно практически не зависит от расхода подпиточной воды и составляет для указанных условий при подпитке 80, 200 и 800 м³/ч, соответственно, 40, 39 и 34 ч.

Свободная углекислота, появляющаяся в сетевой воде при термолизе бикарбонатов кальция и магния, незначительно расходуется на образование карбоната железа. Термодинамически продукты коррозии более устойчивы в виде переходящих последовательно форм: $\text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow \alpha\text{-FeOOH} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$, поэтому расход свободной углекислоты на образование карбоната железа мал. Большая часть углекислоты, образовавшейся при термолизе бикарбонатов кальция и магния, при водообмене выводится из теплосети и нейтрализуется карбонатом натрия. Последний поступает в сеть с умягченной деаэрированной водой. Процесс послеаварийной нормализации содержания свободной углекислоты длителен (до четырех недель и более, в зависимости от интенсивности водообмена).

Выводы

1. Для уменьшения времени послеаварийной нормализации водно-химического режима теплосети по содержанию в воде накипе- и шламообразователей, свободной углекислоты необходимо иметь водоподготовительную установку повышенной производительности.

2. Аварийную подпитку с расходом воды, превышающим возможности водоподготовительной установки, вести химически необработанной и недеаэрированной водой, если суммарная потребность в подпиточной воде (м³) больше рабочего запаса воды в баках – аккумуляторах. После ликвидации аварийной утечки приступить к нормализации качества воды в теплосети с использованием результатов химических анализов, дренажей, воды из баков-аккумуляторов и водоподготовительной установки, если такая принудительная продувка сети из зон наибольшего загрязнения сетевой воды и

нормализация водно-химического режима возможны. Если такая специальная (принудительная) продувка теплосети из зон наибольшего загрязнения сетевой воды невозможна, то невозможна и быстрая нормализация водно-химического режима после аварийной подпитки необработанной водой.

В этом случае для уменьшения времени послеаварийной работы теплосети с ухудшенным качеством сетевой воды аварийную подпитку следует вести при максимальной подаче обработанной и деаэрированной воды, а дополнительную подпитку вести необработанной водой.

3. Аварийную подпитку с расходом воды, не превышающим возможности водоподготовительной установки, или при потребности в

подпиточной воде, не превышающей рабочий запас воды в баках-аккумуляторах с учетом дополнительной выработки воды на водоподготовительной установке, вести химически обработанной и деаэрированной водой. После ликвидации аварийной течи выполнить анализы воды в контрольных точках сети и приступить к дополнительному восстановлению ее нормального водно-химического режима.

Список литературы

1. **Лапотышкина Н.П., Сазонов Р.П.** Водоподготовка и водно-химический режим тепловых сетей. – М.: Энергоиздат, 1982.
2. **Акользин П.А.** Коррозия и защита металлов теплоэнергетического оборудования. - М.: Энергоиздат, 1982.