

УДК.621.311.25

В.В. Шевченко

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО УМЕНЬШЕНИЮ АВАРИЙНОСТИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

На основании анализа существующих конструктивных решений и современных знаний о материалах, технологиях и режимах работы, на примере ТЭН-ов АЭС, проведен анализ возможных причин отказов электронагревателей и сделаны предложения по продлению их срока службы.

**Ключевые слова:** электронагреватель, атомная электростанция, материалы нагревателя, режимы работы.

### Введение

**Постановка проблемы.** Электрические нагреватели (ЭН) применяются в различных областях:

1) Прибрежные и береговые нефтегазодобывающие объекты и перекачивающие станции: нагреватели, осушители и перегреватели природного газа, путевые подогреватели газа, нефти и попутного нефтяного газа и теплоносителей; электронагреватели газа для турбин; электрические перегреватели загряздающего газа; пусковые подогреватели двигателей, нефти, газоперекачивающих компрессоров, опреснители морской воды.

2) Нефтехимическое и химическое производство: нагрев кислот, солей, щелочей и других агрессивных веществ; каталитические печи и реакторы; восстановление катализаторов; сепараторы; редуционные нагреватели; десульфурация (удаление серы), демеркуризация (удаление ртути), гидрокрекинг; перегрев парафинов/воска; аммиачное производство, нефтеперегонные процессы; парогенераторы на термическом масле; врезные нагреватели для нефтехранилищ и пожарных резервуаров; танкерные нагреватели транспортировочных емкостей; нагрев воды в пожарных емкостях и аварийных резервуарах; погружные и проточные нагреватели нефти; производство метанола, метилового спирта.

3) Газодобыча и переработка: подогрев гликолей, этиленгликоля, антифризов, смазочного машинного масла; газодегидрационные котлы; осушители и нагреватели азота, кислорода, озона, водорода и других газовых соединений.

4) Сталелитейное производство и машиностроение: подогрев смазочного машинного масла; восстановление/регенерация газа; кислотоупорные нагреватели; электронагреватели накала; печные нагреватели и сушильные печи.

5) Атомные электростанции, гидроэлектростанции, газотурбинные ТЭС: высокопроизводительные нагреватели болтов, клепки и резьбы для ремонта турбин, корпусов двигателей, ГСМ и ма-

шинных масел; перегрев пара, пароперегреватели; испарители горючего газа; нагрев и осушка природного газа, нефти, тяжелых топлив и топливных фракций; нагрев морской воды; компенсация давления ядерного реактора (нагнетание давления).

Таким образом, можно сделать вывод, что электронагреватели (ЭН) находят самое широкое применение в разных отраслях промышленности и продление срока их службы является важной задачей, которая требует постоянного внимания.

**Анализ литературы.** Роль атомной энергетики неоспорима, ее роли в электроэнергетике Украины посвящены многие работы [1 – 3]. Материалы, представленные в статье, базируются на данных практической эксплуатации ЭН в системах нагрева компенсаторов давления (КД) первого контура АЭС, публикациях по надежности работы электрооборудования, на данных исследований, представленных в материалах конференций и в научных журналах.

**Цель статьи.** Установить причины выхода из строя и определить возможные пути повышения надежности работы ТЭН-ов общепромышленного применения. Исследования проведены на примере исследования работы ЭН-й КД 1-го контура реакторной зоны АЭС.

### Основной материал

Выбор для примера ЭН-й КД первого контура реакторной зоны АЭС связан с тем, что атомная энергетика, по-прежнему, занимает лидирующее положение. Это определяется рядом факторов. Известна озабоченность ученых по поводу "парникового эффекта", что возникает из-за выбросов углекислого газа при сжигании органического топлива, и соответствующего глобального потепления климата на нашей планете. Проблемы загазованности воздуха, "кислых" дождей, отравления рек приблизились во многих районах к критической границе.

Атомная энергетика не потребляет кислорода и имеет малое количество выбросов при нормальной эксплуатации. Если атомная энергетика заменит

классическую тепловую энергетику, то возможности возникновения "парника" с тяжелыми экологическими последствиями глобального потепления будут устранены. Известно, что 1 кг природного урана заменяет 20 т угля [3].

Даже при большом масштабе энергопроизводства на АЭС атомная энергетика не создаст особых транспортных проблем, поскольку требует малых транспортных расходов, что освобождает от постоянных перевозок огромных объемов органического топлива.

На сегодня в 31 стране эксплуатируется 437 ядерных энергоблоков суммарной мощностью почти 352 ГВт. Например, в Западной Европе работает 152 ядерных энергоблока, Восточная Европа эксплуатирует 69 таких энергоблоков. Северная Америка – 123, страны Дальнего Востока – 75. Наибольшая численность энергоблоков сосредоточена в США (107 блоков), Франции (59), Японии (54).

Развитие атомной энергетики в последние годы несколько замедлилось. Частично это связано с общей тенденцией к стабилизации потребностей в электроэнергии, с успехами энергосберегающих технологий. Но главной причиной является то, что широко распространились убеждения о "вредности" атомной энергетики, сомнения в возможностях достижения приемлемого уровня безопасности АЭС на базе современных технологий. После этих событий резко выросла интенсивность научных исследований в области обеспечения безопасности объектов атомной энергетики. Наша работа посвящена вопросу повышению надежности работы одного из блоков оборудования реакторной зоны АЭС – электронагревателей компенсатора давления 1-го контура блока АЭС с ВВЭР-1000.

Практически всегда используют трубчатые электронагреватели (ТЭН-ы) различных типов и размеров для различных сред. ТЭН-ы предназначены для преобразования электрической энергии в тепловую и применяются в качестве комплектующих изделий в промышленных установках и бытовых нагревательных приборах. Нагрев различных сред осуществляется путем конвекции, теплопроводности и излучения.

Преимуществами ТЭН-ов, по сравнению с другими типами нагревателей, являются:

1) возможность эксплуатировать их при непосредственном контакте с нагреваемыми средами, которые могут быть твердыми, газообразными и жидкими при давлении до 4,5 атм;

2) высокая надежность при вибрациях и значительных ударных нагрузках;

3) различные конфигурации, отсутствие напряжения на оболочке.

Существуют разные формы для трубчатых ЭН-й: прямая, U-образная форма, «скрепка». Существуют

ТЭН-ы для воды, воздуха, металла, масла, агрессивных сред. В качестве оболочки применяются электросварные или цельнотянутые трубы из стали марок Ст10 и Ст12Х18Н10Т, из химически стойких сталей, а также из таких металлов, как медь, свинец, титан, цирконий и тантал. ТЭН-ы из Ст 10 используются для нагрева воздуха, воды, нейтральных или щелочных растворов, масел, битума, литейных форм; из нержавеющей стали – для воздуха, воды, пищевых продуктов, кислых растворов и агрессивных сред. Для повышения стойкости нержавеющей ТЭН-ов возможно применение трубки удвоенной толщины. На рис. 1 представлены некоторые конструкции ТЭН-ов. По конструкции ТЭН-ы представляют собой расположенный внутри металлической оболочки нагревательный элемент (спираль или несколько спиралей из сплава с высоким сопротивлением) с контактными стержнями. От оболочки нагревательный элемент изолирован спрессованным электроизоляционным наполнителем. Для предохранения от попадания влаги из окружающей среды торцы ТЭН-ов герметизируют.

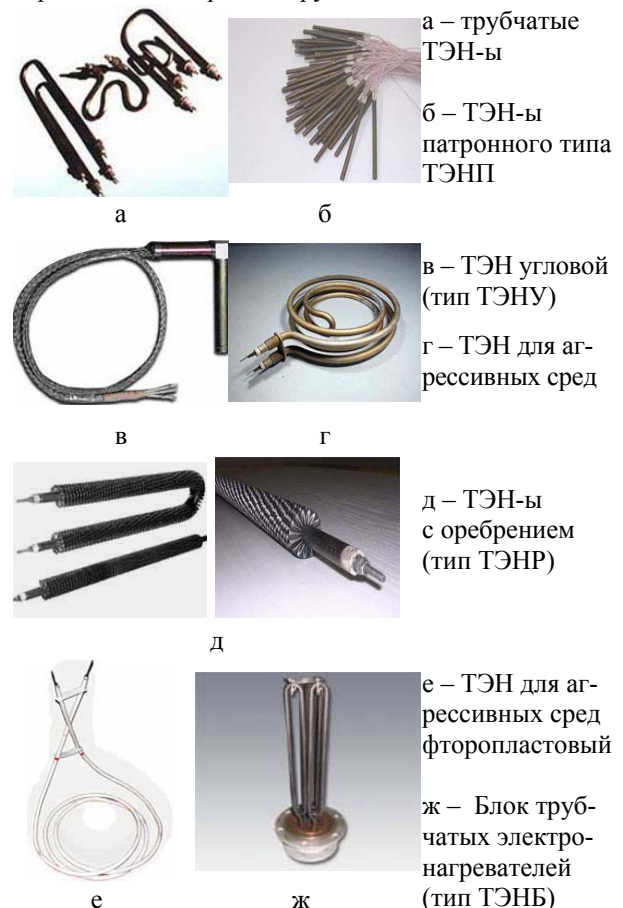


Рис. 1. Общий вид трубчатых электронагревателей

ТЭН-ы могут оснащаться крепежной арматурой – штуцерами с метрической или трубной резьбой. Контактная часть оснащается резьбовой шпилькой (М3, М4, М5), разъемом для втычного монтажа или флажком. Пространственная конфигурация любая.

Для повышения надежности разработаны технологии, позволяющие устанавливать внутри любого ТЭН-а кабельные термодатчики для измерения температуры оболочки и/или спирали (градуировка ХА, ХК, ЖК).

ТЭН-ы для нагрева воздушных сред имеют среднюю наработку до отказа не менее 10000 часов; для нагрева жидких сред – не менее 5000 часов.

Реакторы типа ВВЭР являются основным типом реактора, применяемым в отечественных энергетических установках АЭС. ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор, т.е. теплоносителем и замедлителем в реакторе является обычная химически обессоленная вода под определенным давлением. Такой реактор может работать только в системе двухконтурной ядерной энергетической установки (ЯЭУ). Высокое давление теплоносителя вынуждает помещать активную зону реактора внутри массивного толстостенного стального корпуса.

Реакторы типа ВВЭР наиболее освоены в производстве и эксплуатации, компактны и относительно просты по конструкции. Они обладают высокой удельной мощностью, поэтому широко распространены не только на АЭС, но и в судовых ЯЭУ. Для повышения надежности теплоотвода от активной зоны реактора технологическую схему ЯЭУ обычно разделяют на несколько самостоятельных циркуляционных контуров (петель). ЯЭУ с реактором ВВЭР-1000 является четырех - петлевым.

Первый контур состоит из реактора и четырех петель, каждая из которых включает парогенератор, главный циркуляционный насос (ГЦН) и главные циркуляционные трубопроводы. В активной зоне реактора происходит деление ядер топлива и выделяется большое количество тепловой энергии. Вода под давлением  $1600 \text{ Н/см}^2$  с температурой  $288^\circ\text{C}$  входит через патрубки в корпус и подается в пространство под активной зоной, движется вертикально вверх вдоль топливных элементов и отводится, уже с температурой  $318^\circ\text{C}$ , через выходные патрубки в контур циркуляции. Вскипание теплоносителя предотвращается высоким давлением в контуре. Для создания необходимого давления требуется специальный внешний источник, которым является паровой компенсатор давления (КД). Он служит для компенсации изменения объема теплоносителя при нагревании его в контуре и создания начального давления. Движение воды по контуру обеспечивается работой ГЦН-ов.

Второй контур - это контур с чистой водой. Тепло ядерных реакций передается в парогенераторе воде второго контура, более низкого давления ( $640 \text{ Н/см}^2$ ). Вода 2-го контура превращается в пар, который движется по направлению к турбине.

Турбина состоит из 5 цилиндров: одного цилиндра высокого давления и 4-х цилиндров низкого

давления. Эти цилиндры размещаются на одном валу с турбогенератором. Сначала пар подается на цилиндр высокого давления, а потом на цилиндры низкого давления. Под воздействием пара турбина вращается и вращает ротор, вырабатывая электроэнергию, которая идет на открытую распределительную установку (ОРУ) и распределяется потребителям. Отработанный пар по трубам идет в конденсатор, где превращается в воду. После этого охлаждения вода проходит через множество фильтров, очистителей, через подогреватель низкого давления (ПНД) и подогреватель высокого давления (ПВД) и опять подается в парогенератор, где цикл повторяется снова.

Согласно требованиям МАГАТЭ, для реакторов ВВЭР-1000 недопустимы режимы, хоть в некоторой степени отличные от номинальных. Поэтому они работают либо в номинальном режиме, либо их останавливают.

Система КД необходима только для реакторов, охлаждаемых водой под давлением, и предназначена для компенсации температурных изменений объема воды, заполняющей контур. Она используется также для создания давления при пуске, поддержания давления в эксплуатации и ограничения отклонений давления в аварийных режимах. Компенсатор объема, он же – КД, подключается к выходной ветви одной из петель реакторного контура в его неотключаемой части возможно ближе к реактору. На АЭС применяют только паровой КД.

Корпус КД выполнен из перлитной стали с наплавкой аустенитной нержавеющей. Он имеет водяной и паровой объемы, равные соответственно  $48$  и  $22 \text{ м}^3$ . От неотключаемой части реактора по «холодной» стороне подводится вода на впрыск в сопла в верхней части корпуса КД. На линии впрыска установлены регулировочный 2 и запорный 1 клапаны. В той части корпуса, в которой при всех режимах имеется вода, установлены электрические нагреватели.

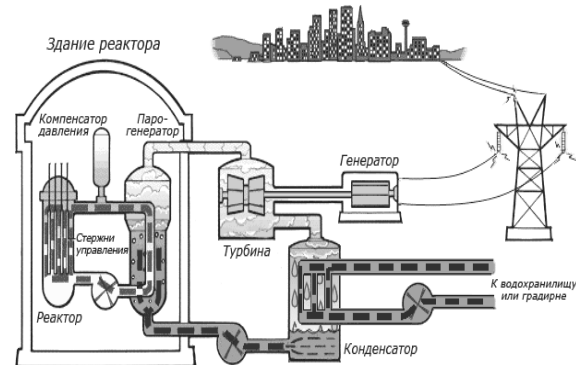


Рис. 2. Компенсатор давления (КД) и система компенсации давления первого контура

В сосуд КД встроено 4 группы ЭН-й, общая мощность блоков ТЭН-ов ( $2520 \text{ кВт}$ ) выбрана из условия обеспечения проектной скорости разогрева

КД при пуске реакторной установки (РУ). Распределение мощностей по группам блоков ТЭН КД уточняется при пусконаладочных работах. Основные критерии при этом следующие:

– мощность 1-й группы ТЭН-ов должна полностью компенсировать потери тепла с КД (потери с теплоизоляции и потери с протечками через линии впрыска при работе на номинальных параметрах);

– мощности остальных групп выбираются из условия оптимальной работы всережимного регулятора давления.

Анализ работы различных блоков ЭН-й позволяет сделать выводы:

1) так как 3 и 4 группы не используются при работе блока, а включаются только при пуске и останове блока, а так же при аварийных и внештатных режимах работы блока, то выход из строя ЭН-й этих групп – событие редкое и проблем не создает.

2) 1 и 2 группы ТЭН-ов имеют по 3 блока нагревателей каждый, но имеют разный режим работы.

1 группа – включена постоянно, так как предназначена для компенсации тепловых потерь, и проблем с выходом из строя ЭН-й почти нет, статистика отказов по ТЭН-ам этой группы значительно ниже. В табл. 1 приведенные данные отказов ТЭН-ов, (шт. в год).

Таблица 1

Статистика выхода из строя ТЭН-ов 1-й и 2-й групп за период с 1997 по 2008 г. на Запорожской АЭС

№№ блоков	№ ТЭН-ов	Число отказов	№№ блоков	№ ТЭН-ов	Число отказов
1 блок	1	3	4 блок	1	3
	2	<b>10</b>		2	<b>17</b>
2 блок	1	5	5 блок	1	4
	2	<b>14</b>		2	<b>8</b>
3 блок	1	3	6 блок	1	1
	2	<b>20</b>		2	<b>16</b>

2 группа ТЭН-ов включается примерно 20-30 раз в сутки, процент выхода ТЭН-ов этой группы, (если сравнить с 1-й группой) намного больше. И это уже проблема, так как для этой группы никакого резервирования ТЭН-ов не предусмотрено. Если рассмотреть статистику отказов за 12 лет (что предполагает уже не случайность, а в некотором роде статистические данные, на основании которых можно сделать вывод), то видно, что ТЭН-ы 2-й группы выходят из строя в 4,5 раза чаще, чем нагреватели 1-й группы, (ЭН-ли 1-й группы – отказало 19 шт, 2-й группы – 85 шт.).

В первом контуре водо-водяных энергетических реакторов в качестве теплоносителя применяется вода, недогретая до кипения примерно на 60°C (при номинальном давлении в первом контуре). Выбор именно такой величины недогрева обусловлен

компромиссом между достижением максимальных параметров теплоносителя на выходе из реактора (и, следовательно, получения высокого КПД установки в целом) при заданном номинальном давлении в 1-м контуре и обеспечением запасов до кризиса теплообмена на оболочках топливных элементов, а также обеспечение возможности работы ГЦН-ов.

Если рассмотреть режим работы 2-й группы ТЭН-ов, то можно сделать вывод, что 1-я группа ЭН-й не решает поставленной задачи, и для компенсации тепловых потерь постоянно и очень часто включается 2-я группа ЭН-й. Высокая частота включения 2-й группы обусловлена тем, что:

1) предъявляются очень высокие требования к точности давления в 1-м контуре реакторной установки (РУ);

2) возможно обеспечение только очень малой мощности «докомпенсации» тепловых потерь за счет включения 2-й группы ТЭН-ов.

Выход из строя одного ТЭН-а не приводит к останову РУ, но требует неотложных мер по устранению потери мощности в 1-й или во 2-й группах (так как мы рассматриваем проблему 2-й группы, то все, что далее будет рассматриваться, применяем ко 2-й группе). На данном этапе эти проблемы решаются 2 способами.

Первый, более простой – «перепайка на проходке», т.е. ТЭН-ы 2-й группы заменяются ТЭН-ми 4-й группы, а поврежденный ТЭН отключается. Но, вследствие того, что на АЭС в настоящее время старые кабельные проходки заменяются новыми, которые имеют гарантию изготовителя 25 лет, но не дают возможности манипулировать с их выводами.

Второй способ, более сложный, применяется только в случае невозможности применения первого: бросают временную перемычку из ячейки 2-й группы в ячейку 4-й группы. Цель такого решения та же – заменить вышедший из строя блок ТЭН-ов 2-й группы на блок ТЭН-ов 4-й группы. Такое решение возможно, т.к. запас мощности 4-й группы допускает потерю мощности до 90 кВт. В табл. 2 приведены данные технических параметров КД.

Но реальные данные по статистике отказов показывают, что случаются одновременные отказы 2-го и 4-го блоков (выход из строя сразу 3-х ЭН 2-й группы, плюс к этому по одному нагревателю 1-й группы).

Такие потери мощности компенсировать очень сложно, поэтому стала задача поиска других способов снижения вреда от выхода из строя ТЭН-ов.

Регулирование уровня теплоносителя в КД обеспечивается регулятором уровня, получающим сигналы по уровню КД, и по средней температуре теплоносителя в 1-м контуре и воздействующим на регулирующие клапаны, установленные на линии подпитки 1-го контура от подпиточных насосов.

Таблица 2

Технические параметры КД			
№ п/п	Наименование	Величина	
1	Давление, МПа, номинальное стационарного режима расчетное гидроиспытания	15,7+ 0,3	
		17,6	
		24,5	
2	Температура, °С: номинальная стационарного режима расчетная, рабочая.	346±2	
		350	
3	Емкость, м <sup>3</sup>	79	
4	Объем воды в номинал. режиме, м <sup>3</sup>	55	
5	Объем пара в номинал. режиме, м <sup>3</sup>	24	
6	Мощность блоков ЭН по группам, кВт:	I группа	270
		II группа	270
		III группа	720
		IV группа	1260
7	Мощность общая блоков ЭН, кВт	2520	

Поддержание давления в 1-м контуре обеспечивается регулятором давления, получающим сигналы по давлению над активной зоной и воздействующим на электрические нагреватели и быстродействующую арматуру на трубопроводе впрыска.

При падении давления в 1-м контуре ниже номинального давления стационарного режима поочередно включаются группы нагревателей, при восстановлении давления – последовательно отключаются, рис. 3, 4.

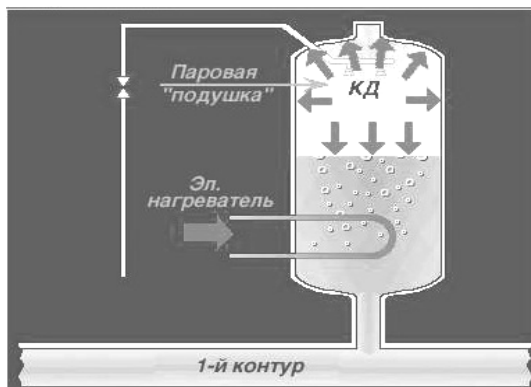


Рис. 3. Дополнительное нагревание среды в КД

В номинальном режиме работы в КД находится 48 м<sup>3</sup> теплоносителя первого контура и 22 м<sup>3</sup> пара с температурой 346°С, что соответствует давлению насыщенного пара 1600 Н/см<sup>2</sup>. При аварийных снижениях давления, когда уровень в КД снижается ниже отметки расположения верхнего ряда ТЭН-ов, система поддержания давления не работает, т.к. по блокировке отключаются все группы нагревателей с запретом включения.

Если опираться на данные завода изготовителя, то срок службы блока ТЭН составляет 5 лет и имеет ресурс 10000 часов. Вероятность безотказной работы блока ТЭН за время гарантийной наработки P(t) = 0,9.

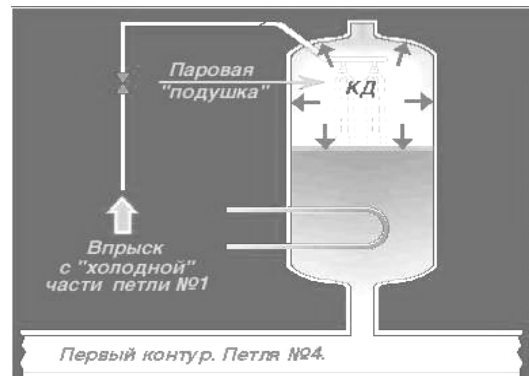


Рис. 4. Охлаждение пара в КД теплоносителем с более низкой температурой

Из этого следует, что ЭН-ли 1-й группы находятся в более тяжелых условиях (так как у них межремонтный период примерно год, т.е. 8760 часов). Если принять во внимание, что различие в работе между ЭН-ми 1-й и 2-й групп заключается в количестве коммутаций, то можно предположить, что частые коммутации (включения и отключения) и связанные с ними процессы приводят к выходу из строя ЭН-й 2-й группы. Следовательно, уменьшив число коммутаций для ЭН-й 2-й группы, не изменяя и не влияя на технологический процесс, вероятнее всего, можно решить существующую проблему.

На надежность работы ТЭН-ов влияют материалы и конструктивные особенности ЭН-й 2-й группы системы КД 1-го контура, а также режимы их работы. В данной работе рассмотрим влияние материалов, из которых сделаны ТЭН-ы, на число отказов и надежность их работы.

Сплавы для ЭН-й разделяют на две группы:

- 1) нихромы и ферронихромы, имеющие аустенитную структуру;
- 2) Fe-Cr-Al сплавы (хромали, фехрالي), имеющие ферритную структуру.

Безникелевые сплавы отличаются от никелевых по особенностям поведения ЭН-й в эксплуатации, хотя области применения сплавов в определенной степени совпадают. Хромали превосходят нихромы по жаростойкости во многих атмосферах: воздушной, углеродсодержащей, серосодержащей, в водороде, вакууме. Особо следует отметить их нечувствительность к примесям в атмосфере серы и сернистых соединений, которые губительны для нихромов.

Fe-Cr-Al сплавы имеют, в сравнении с нихромами, ряд недостатков, которые ограничивают область их применения и усложняют их эксплуатацию. Среди этих недостатков необходимо отметить низкое сопротивление ползучести, обусловленное ферритной структурой и приводящее, при температурах выше 1100°С, к провисанию ЭН под действием собственной массы [1].

Нихром используется в ЭН печей для всех отраслей промышленности, бытовых приборов и аппаратов теплового действия. Широко используется в

высокотемпературных электропечах, печах обжига и сушки, различных электрических аппаратах теплового действия. Применяется в качестве нагревательных и резисторных элементов. Обладает повышенной жаропрочностью, крипоустойчивостью, пластичностью и стабильностью формы.

Сплавы для ЭН-й составляют особую группу сплавов, которые отличаются сочетанием жаростойкости и высокого электрического сопротивления. Такое сочетание следует признать редким, поскольку достижение каждого из указанных свойств в отдельности представляет сложную задачу. Первоначально для ЭН-й использовали резистивные сплавы, способные сохранять стабильность электрических свойств при повышенных температурах. Для этой цели сначала использовали медноникелевые сплавы и даже простые стали, которые работоспособны до 400 – 500°C.

В дальнейшем искали пути повышения рабочей температуры ЭН-й, что привело сначала к исследованию Ni—Cr сплавов, а затем к работе со сплавами Fe-Cr-Al. Хотя с повышением рабочей температуры ЭН-й жаростойкость становилась все более определяющей эксплуатационной характеристикой, развитие сплавов шло обособленно от конструктивных жаростойких сплавов, так как сплавы для ЭН-й отличались явно выраженной спецификой технических требований к ним и методикой оценки их свойств. В результате этого сплавы для ЭН-й отличаются по составу и свойствам от конструктивных жаростойких сплавов и обладают определенным сочетанием свойств, рис. 5.

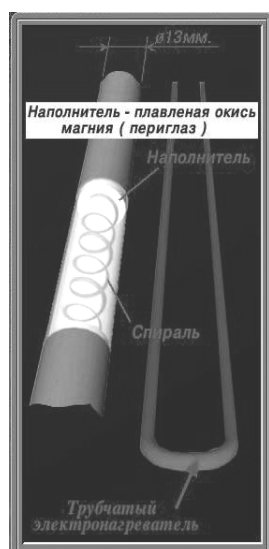


Рис. 5. Конструкция ЭН блока ТЭНБ-90П380И1

ЭН-ли типа ТЭНБ-90П380И1 изготовлены из сплава X20N80, т.е. из нихрома. Рекомендуется применять для ЭН-й электротермическое оборудование повышенной надежности. ЭН – это трубка диаметром 13 мм, выполненная из сплава 08X18N10T,

внутри которой заключена спираль из нихромового провода. Пространство между стенками трубы и спиралью заполнено порошком плавленной окиси магния (периклаз), что позволяет надежно зафиксировать спираль, создать электрическую изоляцию и обеспечить необходимую теплопроводность.

Периклаз хорошо проводит тепло, имеет высокое омическое сопротивление, но он гигроскопичен. Для того, чтобы отделить периклаз от окружающей среды, пространство в оболочке трубки ЭН и наконечником заполняется герметиком (виксинт), диэлектрические свойства которого резко ухудшаются при температуре выше 1500°C. Поэтому конструктивно герметик отделен от горячих поверхностей КД.

По жаростойкости к сплавам для ЭН-й предъявляются более жесткие требования, чем к конструкционным сталям и сплавам: необходима более высокая рабочая температура – до 1400°C и более равномерное по глубине окисление. При эксплуатации конструктивных элементов неравномерность окисления нежелательна, но во многих случаях допустима. При эксплуатации ЭН-й неравномерность окисления приводит к неоднородности электросопротивления, к локальным перегревам и непрерывному самоускорению процесса окисления на отдельных участках ЭН-ля. Высокое значение удельного электрического сопротивления позволяет, при желании или необходимости, сосредоточить заданную тепловую мощность в малом объеме и дает возможность экономить количество потребляемого металла.

Срок службы ТЭН-а зависит не только от жаростойкости, но и от степени неоднородности электрических свойств по длине провода или ленты, как в исходном состоянии, так и в процессе службы, когда возможны неравномерное отслоение окалины, изменение химического состава подокисного слоя, предельная диффузия кислорода или азота, образование окислов, нитридов, включений в металл [6].

Отслоение окалины происходит только при остывании. В проведенных опытах с образцами сплавов хром-никеля и хром-кремния отслоения окалины начиналось в области 700-800°C. Это согласуется с данными работы, в которой установлено, что окалина сплавов типа X20N80 теряет способность пластично деформироваться при температурах ниже 800°C.

Электросопротивление ЭН-й изменяется со временем. В результате окисления, ползучести, возгонки компонентов сплава уменьшается токопроводящее сечение ЭН-ля, изменяется химический состав и структура металла. Допустимая норма изменения исходного электросопротивления, установленная на практике, составляет 20%. Перечислим стадии окисления ЭН-й:

1) Циклическое нарастание и отслоение окалин (более 60% от срока службы ЭН-й) происходит в большей степени за счет диффузии катионов, что характеризует первую стадию окисления и сопровождается образованием пор в подокалине. Конец первой стадии окисления характеризуется снижением концентрации хрома на границе с окалиной до 11 – 12%.

2) На поверхности ЭН-й образуются мелкие, длиной до 2 мм, наросты из закиси никеля, которые имеют черный, с фиолетовым оттенком, цвет и блестят при освещении. Характеризуются интенсивным проникновением кислорода в металл сквозь участки из закиси никеля. Образуется сплошная “корка” черного цвета, состоящая из закиси никеля с растворенным в ней хромом, который при охлаждении растрескивается и отслаивается большими кусками.

3) Характеризуется быстрым повсеместным продвижением фронта окисления вглубь металла и приводит к резкому увеличению электрического сопротивления ЭН-й и, в результате, к их перегоранию.

Длительность этих стадий можно увеличить, изменив режим работы ЭН-й, исключая “критическую” концентрацию хрома на границе с окалиной, при которой ЭН-ль быстро выходит из строя.

### Выводы

1. При охлаждении ЭН-й происходит отслоение внешней части окалины по всей поверхности. Для увеличения срока службы рекомендуется как можно реже охлаждать ЭН-ли высокотемпературных ТЭН-ов ниже 700 – 800°С. Окалина сплавов типа Х20Н80 теряет способность пластично деформироваться при температурах ниже 800°С.

2. При эксплуатации ЭН-й неравномерность окисления приводит к неоднородности электросопротивления и локальным перегревам, к непрерыв-

ному самоускорению процесса окисления на отдельных участках ЭН-й. Появление “горячего пятна” приводит к самоускорению процесса, что завершается местным расплавлением.

3. Срок службы ТЭН-в определяется большим числом факторов: сечением, температурой, конфигурацией, примесями в атмосфере, режимами нагрева, охлаждения и др.

4. ТЭН-ы в холодном состоянии имеют электрическое сопротивление намного меньше, чем при рабочей температуре. Для предотвращения разрушения ЭН-й в момент включения ряд приборов имеет функцию защиты холодных ЭН-й.

### Список литературы

1. Овчинников Ф.Я. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. 3-е изд., перераб. и доп. / Ф.Я. Овчинников, В.В. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 346 с.

2. Шевченко В.В. Проблемы и основные направления развития электроэнергетики в Украине / В.В. Шевченко // Энергетика та електрифікація. – 2007. – № 7 (287). – С. 11-16.

3. Богма С.А. Проблемы работы ядерных энергетических установок АЭС в неноминальных режимах / С.А. Богма, В.В. Шевченко // Системи обробки інформації. – Х.: Харківський університет повітряних сил, 2007. – Вип. 1 (59). – С. 134-140.

5. Гарчев Б.Г. Ядерные энергетические установки: уч. пособие для ВУЗов / Б.Г. Гарчев, Л.Л. Калишевский, Р.С. Демешев и др.; под общ. ред. Н.А. Доллежала; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 629 с.

6. Шевченко В.В. Энергосбережение в энергосистемах. Анализ, проблемы, перспективы / В.В. Шевченко, Л.Н. Омельченко // XI Міжнародна науково-технічна конференція „Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації”, 13-15.05.09 р. Секція „Енергосбереження”. – С. 212-216.

Поступила в редколлегию 18.06.2009

Рецензент: канд. техн. наук, проф. В.П. Соляник, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

### АНАЛІЗ І РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ АВАРІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОНАГРІВАЧІВ

В.В. Шевченко

На підставі аналізу існуючих конструктивних рішень і сучасних знань про матеріали, технології і режими роботи, на прикладі ТЕН-ів АЕС, проведено аналіз можливих причин відмов електронагрівачів і зроблені пропозиції по продовженню їх терміну служби.

**Ключові слова:** електронагрівач, атомна електростанція, матеріали нагрівача, режими роботи.

### ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF MEASURES ON DIMINISHING OF ACCIDENT RATE OF ELECTRO-HEATERS

V.V. Shevchenko

On the basis of analysis of existent structural decisions and modern knowledge about materials, technologies and office hours, on the example of thermal elements which heat of nuclear power plants, the analysis of possible reasons of refusals of electric heaters is conducted and suggestions are done on the extension of their term of service.

**Keywords:** electro-heater, nuclear power plant, materials of heater, office hours.