

4. Handbey T., Cooper Y. «Anal. Chem.», 1969, v. 41, N 2, p. 381.
5. Габескирия В. Я., Грызина В. В., Новиков Ю. Б. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 4, с. 240.
6. Meek M., Rider B. NEDO-12154-1, 1974.
7. Сидоренко В. Н., Беляева Е. Д. Препринт ИАЭ-1171. М., 1966.
8. Новиков Ю. Б., Габескирия В. Я., Масленникова М. Н. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 4, с. 278.
9. Luffin J., Szatmary Z., Vanuxsem J. «J. Nucl. Energy», 1972, v. 26, p. 627.

Поступила в Редакцию 27.08.79
В окончательной редакции 18.03.80

УДК 621.039.53

Опыт применения углеродистой стали при бескоррекционном водно-химическом режиме на АЭС ВК-50

ЗАБЕЛИН А. И., АНДРЕЕВА А. Б., ЕЩЕРКИН В. М., СТУПИНА Л. Н., КОРНИЛОВ А. С., ШМЕЛЕВ В. Е., ЧЕЧЕТКИН Ю. В.

Проблема использования углеродистой стали в основных контурах АЭС становится все более актуальной. Однако несмотря на многочисленные лабораторные и стендовые испытания [1], свидетельствующие о высокой надежности углеродистой стали в кислородсодержащих воде и паре, а также на положительный отечественный и зарубежный опыт энергетических установок, работающих на органическом топливе, до сих пор не существует единого мнения о возможности замены на АЭС остродефицитной нержавеющей стали на углеродистую.

В этом аспекте опыт эксплуатации АЭС ВК-50 следует рассматривать как уникальный промышленный эксперимент по применению углеродистой стали в циркуляционных контурах энергетических установок с кипящим ядерным реактором. Результаты, полученные после испытаний длительностью 100 000 ч, свидетельствуют о высокой работоспособности и надежности углеродистой стали в условиях парового участка контура. В то же время опыт эксплуатации некоторых тепловых станций, в частности Конаковской ГРЭС, и результаты, полученные в течение года после внедрения на АЭС ВК-50 кислородного водно-химического режима, показывают, что при поддержании в теплоносителе конденсатно-питательного тракта концентрации кислорода не менее 200 мкг/кг обеспечивается достаточная коррозионная стойкость углеродистой стали и на этом участке контура.

Далее приведены результаты исследования водно-химических режимов, коррозионного состояния углеродистой стали и стойкости защитных пленок на поверхностях трубопроводов основного циркуляционного контура АЭС ВК-50.

Цикл циркуляции теплоносителя в основном контуре АЭС ВК-50 осуществляется следующим образом. Насыщенный пар, вырабатываемый в реакторе через сепараторы высокого (СВД) и низкого (СНД) давления, подается непосредственно на турбину АК-70-13. Конденсат отработанного пара направляется конденсатными насосами через

две ступени подогревателей низкого давления (ПНД) в деаэрактор атмосферного типа (давление 0,12 МПа, температура 377 К). Деаэрированный конденсат питательными насосами высокого давления подается в реактор и на охлаждение механизмов СУЗ.

Корпуса СВД и СНД, паропроводы, корпуса конденсаторов, конденсаторопроводы, корпуса подогревателей низкого давления и деаэраторов и питательный тракт до отсекающей арматуры выполнены из углеродистой стали 20, 22к, 3, что составляет 32,8% общей поверхности всего контура.

С момента пуска АЭС ВК-50 (15 октября 1965 г.) работает по водно-химическому режиму с дозировкой гидразин-гидрата, однако уже через короткий промежуток времени (до 2 ноября 1965 г.) оказалось, что этот режим не пригоден для трубных систем конденсаторов турбины, подогревателей низкого давления и других теплообменников, изготовленных из латуни [2]. Поэтому в дальнейшем никакой коррекции водно-химического режима не проводили.

Неотлаженность режимов работы основного оборудования, приводившая к частым длительным простоям, а также остатки монтажных загрязнений явились причиной неустойчивости водно-химических показателей в первые годы эксплуатации станции. По мере отмывки контура, отладки оборудования и совершенствования его обслуживания эти показатели постепенно улучшались и начиная с 1968—1969 гг. практически стабилизировались.

Состояние поверхностей основного контура после первых трех лет эксплуатации было удовлетворительным, без признаков прогрессирующей коррозии углеродистой стали. Тогда же методом электронографии было обнаружено образование защитных окисных пленок, состоящих из магнетита Fe_3O_4 и магемита $\gamma-Fe_2O_3$ [3].

Оценка коррозионного поведения трубопроводов основного контура после 100 000 ч эксплуата-

Содержание продуктов коррозии (мкг/кг) в теплоносителе при бескоррекционном (I) и кислородном (II) водно-химических режимах (по данным на 1 декабря 1979 г.)

Теплоноситель	Железо		Медь		Цинк	
	I	II	I	II	I	II
Питательная вода (без конденсатоочистки)	14	5	15	5	20	2
Вода реактора	22	10	30	20	25	3

ции (конец 1977 г.) характеризует, таким образом, условия работы установки в бескоррекционном водно-химическом режиме.

Нейтральный кислородный водно-химический режим с дозированным введением кислорода в конденсатно-питательный тракт до концентрации 200 мкг/кг используется с июля 1978 г. Первый опыт эксплуатации установки в этом режиме (~8000 ч) показал заметную тенденцию к снижению концентрации продуктов коррозии в теплоносителе по сравнению с бескоррекционными условиями (см. таблицу).

За время эксплуатации АЭС никаких мер по консервации оборудования и трубопроводов при остановках реактора не принимали. Следует учесть, что значительную часть времени эксплуатации (~34,8%) составляют планово-предупредительные и капитальные ремонты.

Для исследования состояния материалов контура в начале 1978 г. сделаны метровые вырезки труб со сварными стыками из следующих участков циркуляционного контура:

паропровода между СВД и СНД (сталь 20, диаметр 325 × 10);

конденсатопровода после ПНД (сталь 20, диаметр 325 × 8);

трубопровода перед питательными насосами (сталь Зкп, диаметр 425 × 5).

При исследовании образцов труб определяли коррозионное состояние, характер отложений, механические свойства, а также сохраняемость защитных свойств окисных пленок, образовавшихся на поверхности углеродистой стали в реальных условиях эксплуатации АЭС.

Стандартные образцы для механических и металлографических исследований основного металла и сварных швов изготовлены из полученных отрезков трубопроводов согласно имеющимся нормативам [4] и ГОСТ 6996—66.

Паропровод после СВД. Окисные пленки, образующиеся в рабочих условиях (давление 2,5 МПа, температура 497 К, концентрация кислорода до 30 мг/кг), характеризуются плотностью и хорошей адгезией к металлу. По данным электронографиче-

ческого анализа, они состоят из магемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и магнетита Fe_3O_4 , которые, как известно [5], обладают защитными свойствами.

Толщина слоя металла, подвергнутого коррозионному воздействию в течение 100 000 ч эксплуатации, составляет 70—150 мкм, что соответствует 3—4 баллам стойкости (весьма стойкие, стойкие) по ГОСТ 13819—68. Отличительной особенностью коррозии углеродистой стали 20 в кислородсодержащем паре при таком продолжительном времени эксплуатации является отсутствие глубоких питтингов, характерных для начального периода, и развитие преимущественно общей коррозии (рис. 1, а).

Конденсатопровод. Среда — конденсат пара турбины при 305 К, содержащий кислород в количестве 50 мкг/кг. Продукты коррозии, образующиеся на поверхности углеродистой стали 20 конденсатопровода, рыхлые, легко отслаивающиеся, состоят, главным образом, из магнетита Fe_3O_4 и гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Характер коррозии — язвенный. Глубина язв ~300 мкм (см. рис. 1, б). Коррозионная стойкость оценивается 4—5 баллами.

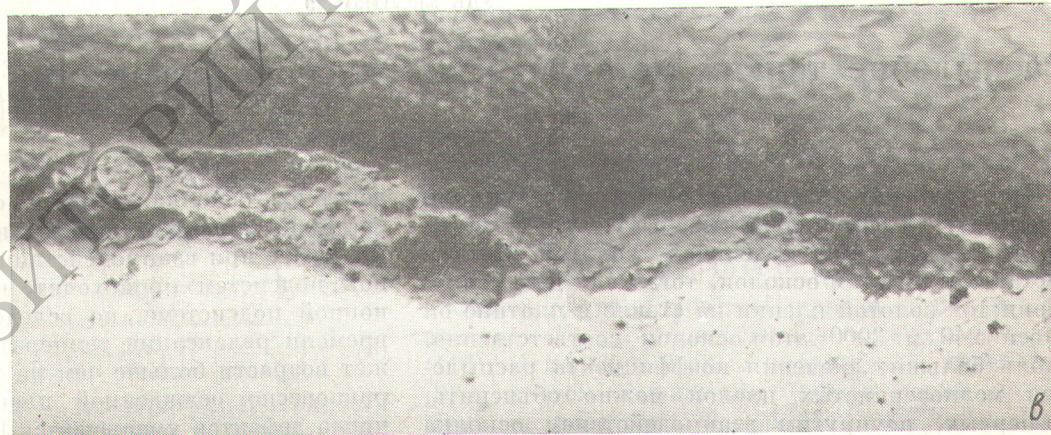
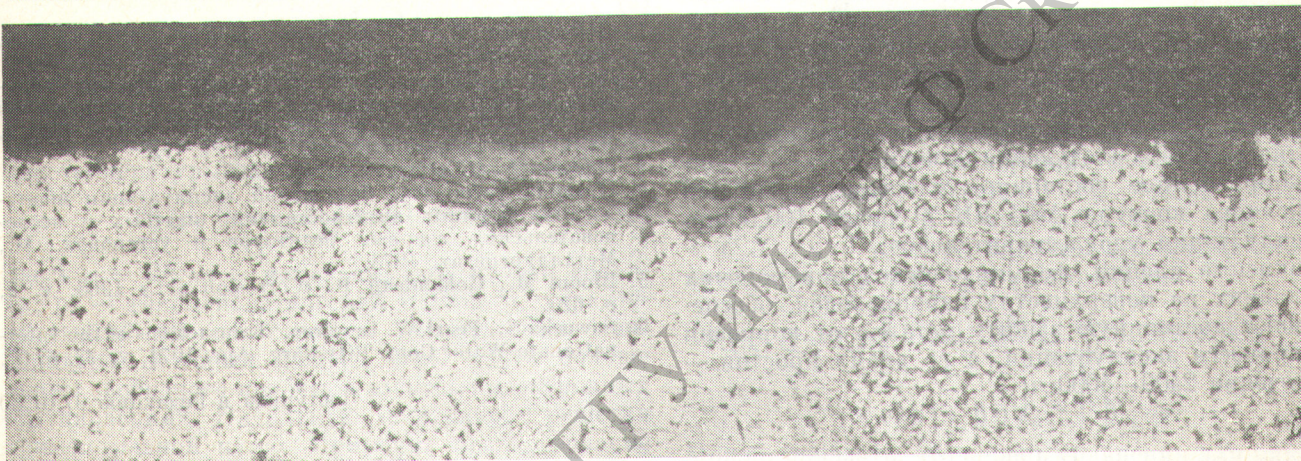
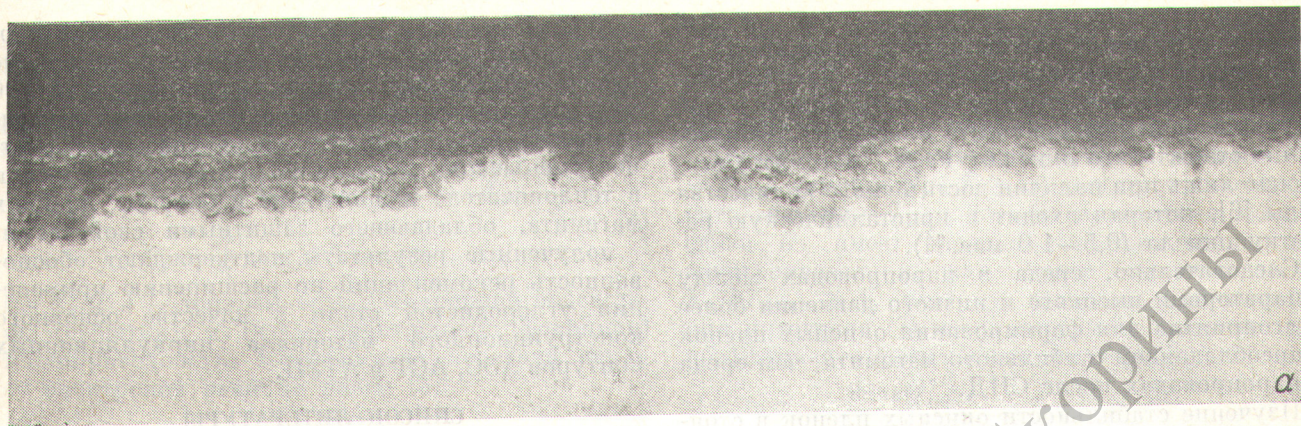
Трубопровод питательной воды. Коррозия углеродистой стали (сталь Зкп) питательного трубопровода преимущественно равномерная. Толщина слоя металла, подвергнутого коррозии, составляет ~200 мкм (см. рис. 1, в). Коррозионная стойкость соответствует 4 баллам. Так же, как и на конденсатопроводах, поверхность трубопроводов питательной воды покрыта пленкой продуктов коррозии, образованной в основном магнетитом и гематитом.

Механические свойства металла трубопроводов вырезанных участков циркуляционного контура определяли по результатам испытаний малых гагаринских образцов, изготовленных из основного металла и металла сварных швов.

Результаты показали, что свойства металла и сварных швов трубопроводов после такого длительного срока эксплуатации не имеют существенных отклонений от требований ГОСТ 5520—69.

Состояние образцов-свидетелей, испытанных в кислородном режиме. Исследование индикаторных образцов углеродистой стали, находившихся в конденсатопроводе перед деаэратором (температура конденсата 360 К, содержание кислорода ~200 мкг/кг), показало, что коррозия, развившаяся за 8000 ч испытаний, носит преимущественно равномерный характер. Скорость коррозии 0,03—0,05 мм/год (4 балла стойкости), вынос продуктов коррозии не превышает 0,01 г/(м²·сут).

Продукты коррозии, сформировавшиеся в конденсатном тракте в условиях кислородного водно-химического режима, представляют собой смесь окислов типа $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (магемит), Fe_2O_3 моноклинной сингонии и гидратированного окисла $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$ ромбической сингонии. Появление в окисных пленках высшего окисла железа — магемита,



Состояние поверхности паропровода (а), конденсаторпровода (б), питательного трубопровода (в) после 100 000 ч эксплуатации ($\times 200$)

обладающего защитными свойствами, обусловлено повышенным содержанием в конденсате кислорода.

Стабильность окислов железа во время простоя АЭС исследовали в целях определения сохранности защитных свойств этих окислов. Испытания проводили на образцах, находившихся в паропроводах в течение 12 500 ч и выдерживаемых затем в условиях, имитирующих стояночный режим.

Исследованиями установлено, что стабильность окислов зависит от условий их формирования.

Так, окислы, образовавшиеся во влажном кислородсодержащем паре (участок паропровода между сепараторами высокого и низкого давления, влажность пара 2 мас.%) и представляющие собой в основном магемит, сохраняют свой фазовый состав в течение ~ 4000 ч.

В то же время окислы, образовавшиеся в условиях сухого пара (главный паропровод, влажность пара 0,02—0,1 мас.%), изменяют свой фазовый состав уже через 2400 ч. При этом магемит, содержание которого в окисной пленке ниже, чем

в предыдущем случае, превращается в рыхлый гематит с низкими адгезионными свойствами.

Различие в устойчивости окисных пленок, очевидно, вызвано тем, что они сформировались в средах, имеющих неодинаковую влажность. Образование стабильного окисла $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (магемита) возможно лишь при наличии достаточного количества воды [6], которая входит в кристаллическую решетку окисла (0,5—1,0 мас. %).

Следовательно, среда в паропроводах между сепараторами высокого и низкого давления более благоприятна для формирования окисных пленок с преобладанием стабильного магемита, чем среда в паропроводах после СНД.

Изучение стабильности окисных пленок в стоячном режиме свидетельствует о том, что паропроводы АЭС с кипящим реактором при остановках продолжительностью до 3 мес не требуют консервации.

Таким образом, выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

коррозионное состояние углеродистых сталей основного контура АЭС ВК-50 после 100 000 ч эксплуатации удовлетворительное;

окисные пленки, формирующиеся при рабочих условиях на поверхностях паропроводов, обеспечивают постоянную защиту металла от коррозии в процессе эксплуатации, а во время простоя — в течение 2400—4000 ч;

предварительные результаты исследований коррозии при кислородном водно-химическом режиме после ~8000 ч эксплуатации свидетельствуют об уменьшении коррозии углеродистой стали конденсатно-питательного тракта, на что указывает заметное уменьшение содержания продуктов коррозии в теплоносителе и появление в окисных пленках магемита, обладающего защитными свойствами; полученные результаты подтверждают обоснованность рекомендаций по расширению применения углеродистой стали в качестве основного конструкционного материала циркуляционных контуров АЭС, АСТ и АТЭЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Несмеянова К. А. «Атомная энергия», 1970, т. 29, вып. 2, с. 86.
2. Забелин А. И. и др. В кн.: Водные режимы водо-водяных реакторов, радиационный контроль теплоносителей и средства снижения радиационной опасности. Berlin, VVB Kraftwerksanlagenbau, 1968, с. 72.
3. Забелин А. И. и др. Там же, с. 105.
4. Правила устройства безопасной эксплуатации оборудования атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. М., Металлургияиздат, 1973.
5. Bloom M., Goldenberg R. «Corrosion Sci.» 1965, v. 5, p. 623.
6. Sawocka S., Pearl W. In: Proc. Transactions of the Internationale Water Conf. Pittsburg, Apr. 1971, v. 33, p. 67.

Поступила в Редакцию 07.01.80

УДК 539.211:546.79

Распыление тонких металлических пленок осколками деления ядер

БИТЕНСКИЙ И. С.

При изучении распыления золота осколками деления ^{252}Cf было обнаружено [1], что коэффициент распыления массивной золотой фольги составляет 13 атом/осколок, тогда как для мелкозернистой золотой пленки на стекле и платине он равен 240 и 3000 атом/осколок соответственно. Столь большие значения коэффициента распыления мелкозернистых пленок можно объяснить, во-первых, неупругим взаимодействием осколка деления с атомами твердого тела, так как упругие потери составляют всего несколько процентов полных энергетических потерь осколка, и, во-вторых, наличием большого числа дефектов в мелкозернистой пленке. Аналогичная ситуация имеет место при образовании треков осколков деления: в совершенных металлах треки не обнаружены, тогда как в мелкозернистой пленке существуют дефектные области вдоль траектории осколка [2].

Изменение свойств металла при прохождении осколка деления рассматривали [3] на основе модели θ -вспышки. В этой модели в результате взаимо-

действия осколка деления с электронной подсистемой температура последней сильно возрастает. Далее при взаимодействии электронной и ионной подсистем происходит передача энергии к ионной подсистеме, но вследствие значительного времени релаксации температура решетки не может возрасти больше чем на 100 К. Однако в неравновесно осажденной пленке из-за большого числа дефектов уменьшается [4] длина свободного пробега в электрон-фононных взаимодействиях, что может увеличить передачу энергии к ионной подсистеме и, как следствие, увеличить температуру решетки выше температуры плавления. Атомы, вылетевшие из образовавшегося теплового пика (θ -вспышки), дают вклад в коэффициент распыления наряду с атомами, распыленными вследствие развития каскада упругих столкновений.

Ниже на основе модели θ -вспышки выводится выражение для коэффициента распыления металлической пленки, а также рассматриваются особен-