

УДК 62.52; 532.546; 621.114.16

ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ АЭС. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Е.Н. Сычев, к.т.н., доц., В.А. Пухлий, д.т.н., проф., Л.Н. Пичугова, ст. препод.

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Рассматривается математическая модель распределенных процессов в рекуперативных теплообменных аппаратах АЭС, и делается анализ новейших методов неразрушающего контроля и диагностики трубных элементов поверхностей теплообмена.

Введение

В состав основного и важного для безопасности оборудования энергоблоков АЭС входит большое количество теплообменных аппаратов (теплообменников) используемых в качестве охладителей или нагревателей, конденсаторов или парогенераторов. От исправности теплообменных аппаратов (т/а) существенно зависит как безопасность, так и эффективность эксплуатации энергоблоков АЭС [1 - 6]. Например, тысячи тонкостенных теплообменных труб парогенераторов АЭС являются важной частью границы первого контура АЭС и для того, чтобы выполнять функции эффективного барьера радиационной безопасности все эти трубы не должны иметь сквозных дефектов.

Теплообменные аппараты АЭС являются, в основном, т/а рекуперативного типа. Исправность теплообменных аппаратов такого типа во многом определяется состоянием трубной поверхности теплообмена. В рекуперативных теплообменных аппаратах применяются трубные поверхности теплообмена самой разнообразной конструкции (прямотрубные, U-образные, спиральные и т.д.). В процессе эксплуатации трубные элементы поверхностей теплообмена подвергаются значительному коррозионному и эрозионному износу, что может привести к потере герметичности и даже разрушению трубных элементов. Поэтому для обеспечения надежности и безаварийности рекуперативных теплообменных аппаратов на этапах их разработки и эксплуатации весьма важное значение имеет успешное решение задач (1) математического моделирования распределенных процессов в процессе проектирования и (2) неразрушающего контроля трубных элементов в процессе эксплуатации.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является исследование комплексного подхода к изучению процессов разработки и эксплуатации теплообменных аппаратов. Для решения данной задачи рассматривается математическое моделирование распределенных процессов при разработке теплообменных аппаратов и неразрушающий контроль их трубных элементов в процессе эксплуатации.

Математическое моделирование распределенных процессов в теплообменных аппаратах

Основой технологических процессов в теплообменных аппаратах являются процессы тепломассообмена. В связи с тем, что экспериментальные исследования таких процессов в лабораторных условиях, как правило, являются очень сложными и дорогостоящими, а в ряде случаев просто трудно осуществимыми, численное моделирование процессов тепло- и массообмена приобретает все более значительную роль. Моделирование указанных процессов представляет собой также достаточно сложную задачу, поскольку эти процессы описываются системами нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. При этом тепловые и диффузионные процессы исследуются как процессы, происходящие в сплошных средах, состояние которых характеризуется макроскопическими параметрами. Для однородной движущейся среды такими параметрами являются температура, концентрация, давление, скорость. Физические свойства (плотность, теплоемкость, вязкость) предполагаются известными.

Математическое моделирование распределенных процессов тепломассообмена в движущихся двухфазных средах, с учетом потока тепла вдоль оси, обусловленных турбулентной или молекулярной теплопроводностью, основано на решении следующей системы уравнений [1]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} \pm v_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= c_1(q_2 - q_1); \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} + v_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} &= c_2(q_1 - q_2). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь $T_1(x, t)$ и $T_2(x, t)$ – температура первой и второй сред, движущихся со скоростями v_1 и v_2 , при этом если среды движутся прямооток, то знак «+», при v_1 , а если противоток, то знак «-».

Выражения для величин χ_1 и χ_2 имеют следующий вид:

$$c_1 = \frac{kp}{s_1 c_1 g_1}; \quad c_2 = \frac{kp}{s_2 c_2 g_2}, \quad (2)$$

где k – коэффициент теплопередачи;

p – периметр поперечного сечения поверхности раздела сред;

s_i – площадь поперечного сечения i -й среды;

c_i – теплоемкость;

g_i – удельный вес среды ($i = 1, 2$).

Для газовых теплоносителей резкое изменение температуры вдоль поверхности теплообмена, при постоянстве массового расхода, сопровождается значительным изменением скорости теплоносителей вследствие существенного изменения их удельных плотностей. Это приводит к необходимости рассмотрения более сложных уравнений тепломассообмена с учетом дополнительных связей между параметрами. В этом случае, считая давление постоянным, получим следующее уравнение, связывающее изменение температуры и скорости газового теплоносителя:

$$T_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} = c^*(T_2 - T_1), \quad (3)$$

где $c^* = \frac{kpR}{c_p s P g}$.

Тогда исходная система уравнений, описывающих процесс теплообмена между газовой фазой с переменной продольной скоростью и жидкой фазой, запишется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= c_1^* T_1 (T_c - T_1) ; \\ \frac{\partial v_1}{\partial x} &= c_1^* (T_c - T_1) ; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} + v_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} &= c_{21} (T_1 - T_2) + c_{23} (T_3 - T_2) ; \\ \frac{\partial T_r}{\partial t} \pm v_2 \frac{\partial T_r}{\partial x} &= c_r (T_{r-1} - T_r) , \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где r – расстояние от оси трубы.

Начальные и граничные условия для прямотока имеют вид

$$\begin{aligned} T_1(0, t) &= T_{\text{вх}}(t); & v(0, t) &= v_{\text{вх}}(t); & j &= 2, 3, \dots, r \\ T_j(0, t) &= T_{\text{вх}}(t); & T_i(x, 0) &= T_i(x). & i &= 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (5)$$

Начальные и граничные условия для противотока запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} T_1(0, t) &= T_{\text{вх}}(t); & v_1(0, t) &= v_{\text{вх}}(t); & j &= 2, 3, \dots, r \\ T_j(1, t) &= T_{\text{вх}}(t); & T_i(x, 0) &= T_i(x). & i &= 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (6)$$

Следует отметить, что система уравнений (4) является нелинейной. Она может использоваться при анализе переходных процессов теплообмена и массообмена, протекающих с изменением скорости сред. Для практического разрешения этой системы могут быть рекомендованы численные методы, изложенные в [2].

Анализ методов неразрушающего контроля рекуперативных теплообменных аппаратов

В целях исключения аварий, выхода из строя и уменьшения внеплановых остановов основного оборудования энергоблоков АЭС вследствие отказов теплообменных аппаратов необходимо осуществлять периодический контроль технического состояния трубных поверхностей теплообмена рекуперативных теплообменных аппаратов методами неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД). Важнейшей проблемой аппаратов такого типа являются течи трубных элементов из-за возникновения дефектов, приводящих к нарушению герметичности трубных систем. Периодический контроль обеспечивает мониторинг скорости износа труб теплообменных поверхностей вследствие развития выявленных дефектов, среди которых основными являются коррозия, утонение стенки, точечная коррозия, коррозионное растрескивание и трещины разного вида. При НК трубных систем теплообменных аппаратов в основном используют вихретоковый метод и некоторые его модификации, а также метод магнитного рассеяния потока, ультразвуковой и оптические методы [3, 4]. Каждый из названных методов имеет свои преимущества, недостатки или ограничения в их использовании.

Вихретоковые методы являются наиболее быстро развивающейся группой методов неразрушающего контроля и хорошо зарекомендовали себя на практике. Эти мето-

ды безопасны, надежны и приемлемы для производств, где предъявляются высокие требования к качеству контроля состояния оборудования в рамках жестких ограничений технических норм и условий. Вихретоковый контроль (ВТК) возможен только для контроля качества электропроводящих материалов. Достоинством этого метода является хорошая чувствительность к приповерхностным дефектам. Недостатком этого метода является очень малая чувствительность к дефектам, залегающим на большой глубине (приемлемой является глубина залегания дефекта до 7 мм).

В технологических процессах энергетических, химических, фармацевтических и других производств широко применяются вихретоковые методы с использованием датчиков, движущихся внутри трубы (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид проходных вихретоковых датчиков, движущихся внутри трубы

При контроле теплообменных аппаратов датчик вводится в трубу с помощью толкателя, позволяющего развивать скорость до 8 м/с. Оборудование для вихретокового контроля широко используется на АЭС Украины и России. При этом результаты вихретокового контроля по каждой трубе сохраняются в базе данных и могут быть востребованы в любое время. Это позволяет не только регистрировать дефекты, но и отслеживать динамику их развития, что дает возможность рассчитывать остаточный ресурс работы оборудования, а также избегать внеплановых остановок и экономических потерь в связи с незапланированным ремонтом.

При обследовании труб т/а решаются следующие задачи: постоянного или периодического контроля качества (достоверности) результатов; классификации труб по состоянию (бездефектные; дефектные работоспособные; дефектные неработоспособные, то есть требующие срочного отглушения или замены); обеспечения максимальной производительности процесса контроля. Последняя задача является особенно актуальной при контроле трубных систем крупных т/а, состоящих из тысяч или даже десятков тысяч теплообменных труб (парогенераторы АЭС).

При контроле т/а с большим количеством труб, когда производительности существующих методов ВТК становится уже явно недостаточно, рекомендуется применять метод дальнего действия низкочастотного ультразвукового контроля (НЧ УЗК) на основе использования направленных волн [5, 6]. Эти волны распространяются на большие расстояния от места закрепления датчиков и, отражаясь от дефектов, генерируют эхо-сигналы, по которым можно оценить местоположение и, может быть, даже тип дефекта. При использовании данного метода применяются направленные волны продольной и крутильной мод, распространяющиеся в трубах с различной скоростью.

Протяженность зоны контроля при использовании метода направленных волн (МНВ) обратно пропорциональна частоте волн. Отсюда следует, что для увеличения дальнего действия и разрешающей способности метода направленных волн следует снижать частоту волн.

По сравнению с методами ВТК, контроль методом направленных волн имеет следующие преимущества:

- отличается более высокой производительностью;
- не требует проталкивания датчика вдоль трубы и очистки трубы по всей ее длине;
- создает возможности для оценивания утонения стенки трубы, независимо от расположения (внутреннего или наружного) дефекта.

Зонды для контроля труб теплообменных аппаратов методом направленных волн

Ключевыми элементами диагностических систем для контроля состояния трубных элементов т/а методом направленных волн являются погружаемые во внутреннюю полость труб специальные устройства излучатели-приемники, которые принято именовать зондами. Такие зонды обеспечивают активную локацию каких-либо объектов (в нашем случае дефектов) в сплошном материале трубы. При активной локации в сторону предполагаемого местонахождения объекта с помощью излучателя направляется соответствующий зондирующий поток сигналов (акустических, световых, магнитных и др.), а отраженное излучение (эхо) затем улавливается и регистрируется приемником.

В зондах для контроля состояния труб обычно используются магнестрикционные, электромагнитоакустические и пьезоэлектрические преобразователи. Например, в работе [7] представлен зонд для возбуждения направленных волн крутильной моды на основе магнестрикционного (МС) преобразователя (рис. 2).

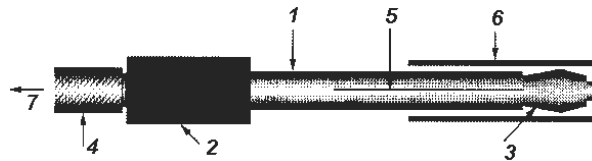


Рис. 2. Конструкция зонда на основе магнестрикционного преобразователя: 1 – цилиндрический волновод; 2 – магнестрикционный преобразователь; 3 – носик тягового стержня; 4 – рукоятка; 5 – продольный разрез; 6 – контролируемая труба; 7 – направление вытягивания рукоятки

Схема работы МС-зонда следующая: магнестрикционный преобразователь, установленный на полем цилиндрическом волноводе, излучает крутильные волны, принимая затем отраженные эхо-сигналы от дефектов. Волновод вводится в контролируемую трубу 6, а затем путем вытягивания рукоятки 4 (в направлении 7) наконечник волновода расширяется при затягивании носика 3 тягового стержня в волновод, обеспечивая плотный механический контакт между волноводом и внутренней поверхностью контролируемой трубы.

Магнестрикционный преобразователь излучает импульс крутильной волны, который распространяется в сторону конца волновода, введенного в трубу, проходя в трубу через механические контакты. В результате эхо-сигналы направленных волн отражаются от дефектов в трубе и фиксируются магнестрикционным преобразователем. Зонд на основе магнестрикционного преобразователя может использоваться при дистанционном контроле труб теплообменников из различных материалов и форм, в частности, труб с U-образным изгибом и оребренных труб.

В работе [8] рассматривается конструкция зонда на основе электромагнитоакустических (ЭМА) преобразователей (рис. 3).

Целесообразность использования зонда на основе ЭМА-преобразователя для контроля технического состояния труб т/а заключается в возможности сокращения неконтролируемой начальной зоны.

Следует отметить также предложенную С.А. Виноградовым [9] оригинальную конструкцию зонда для контроля труб т/а направленными волнами крутильной моды (рис. 4).

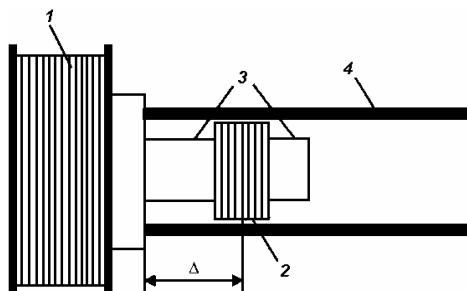


Рис. 3. Конструкция зонда на основе ЭМА-преобразователя: 1 – электромагнит; 2 – катушка; 3 – прокладка; 4 – стальная труба

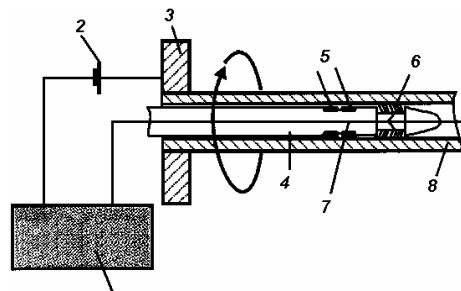


Рис. 4. Конструкция зонда для генерирования направленных волн: 1 – блок управления; 2 – источник постоянного тока; 3 – трубная доска; 4 – зонд; 5 – катушки постоянного тока; 6 – контактная щетка; 7 – проволоочный проводник; 8 – труба теплообменника

Генерирование направленных волн крутильной моды в трубах теплообменников зондом данной конструкции основывается на применении кольцевого намагничивания трубы совместно с переменным магнитным полем, которое воздействует перпендикулярно направлению постоянного магнитного поля. Возможным способом получения кольцевого намагничивания в данном зонде является образование постоянного тока вдоль боковой поверхности трубы, при этом рабочий ток, который проходит по расположенной в центре зонда проволоке, достаточен для обеспечения однородного магнитного поля в трубе. Зонд обеспечивается набором заменяемых катушек переменного тока. Данные катушки обеспечивают возбуждение и прием направленных волн крутильной моды.

В настоящее время институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ ведет работы по созданию отечественных конструкций зондов на основе пьезопреобразователей, которые позволяют возбуждать в трубах т/а направленные волны продольной и крутильной мод со стороны внутреннего отверстия [5, 6].

Тем не менее, следует отметить, что для количественной оценки степени поражения дефектом поперечного сечения стенки, а также площади труб т/а по-прежнему применяются традиционные, хотя и более медленные, средства рентгенографического, магнитного, ультразвукового и других методов контроля [3, 4, 10].

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

Выводы

1. Современное исследование стационарных и нестационарных режимов тепло-массообмена в теплообменных аппаратах должно базироваться на использовании предлагаемой математической модели распределенных процессов.

2. В качестве более производительного метода неразрушающего контроля труб в теплообменных аппаратах целесообразно использовать метод ультразвукового контроля на основе направленных волн продольной и крутильной мод.

**ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ АЕС. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ,
КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ**

Є.М. Сичов, В.О. Пухлій, Л.М. Пічугова

Розглядається теорія математичного моделювання розподілених процесів у рекуперативних теплообмінних апаратах АЕС; проаналізовані новітні методи неруйнівного контролю і діагностики трубних елементів поверхонь теплообміну.

**NPP's HEAT EXCHANGERS. PROCESSES MODELLING, OPERATING
CONDITIONS CONTROL**

E. Sychov, V. Puhly, L. Pichugova

It was considered the mathematical model of distributed processes in the NPP' recuperative heat exchangers; the up-to-date methods of the nondestructive inspection and diagnostics of tube elements of the heat exchange surfaces were analyzed.

Список использованных источников

1. *Девятков Б.Н.* Динамика распределенных процессов в технологических аппаратах, распределенный контроль и управление / Б.Н. Девятков, Н.Д. Демиденко, В.А. Охорзин. – Красноярск: Красноярское книж. изд-во, 1976. – 310 с.
2. *Пухлий В.А.* Численные методы. Теория и практикум в среде MATLAB: учеб. пособие в 2-х т. / В.А. Пухлий. – Севастополь: Изд-во «Черкасский ЦНТЭИ». - Т. I. – 2007. – 412 с. – Т. II. – 2008. – 762 с.
3. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев [и др.] // Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. 656 с., ил.*
4. *Гудошник В.А.* Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій / В.А. Гудошник [и др.] // Зб. наук. праць. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка НАНУ, 2008. - С. 60 - 67.
5. *Патон Б.Е.* Метод низкочастотного ультразвукового контроля протяженных трубопроводов / Б.Е. Патон, В.А. Троицкий, А.И. Бондаренко // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. - № 2. - С. 20 - 30.
6. *Троцкий В.А.* Применение метода низкочастотного ультразвукового контроля технического состояния теплообменников / В.А. Троицкий, А.Н. Бондаренко, В.С. Лазебный // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. - № 4. - С. 63 - 70.
7. *Кван Х.* Зонд направленных волн крутильной моды для дистанционного применения при внутреннем контроле труб теплообменников / Х. Кван, Дж. Ф. Крейн, И. Сенг // Materials Evaluation. – 2005. – 63. - № 4. - Р. 430 - 433.
8. *Ямасаки Т.* Применение электромагнитных акустических сенсоров для направленных волн в неразрушающем контроле проволоки, труб и плит / Т. Ямасаки // Nihakai Kensa. - 2005. - V. 54. – № 11. – Р. 606 - 611.
9. *Vinogradov S.A.* Tuning of Torsional mode Guided Wave Technology for Screening of Carbon Steel Heat Exchanger a Tubing / S.A. Vinogradov // Materials Evaluation. – 2008. – 66. - № 4. – Р. 419 - 424.
10. *Троцкий В.А.* Ультразвуковой контроль, дефектоскопы, нормативные документы, стандарты по УЗК / В.А. Троицкий. - К.: Феникс, 2006. – 224 с.

Надійшла до редакції 15.11.2013 р.