

ратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капица П.Л. Волновое течения тонких слоёв вязкой жидкости/ П.Л. Капица // ЖЭТФ. – 1948. – Т. 18, вып.1. – С. 3-28.
2. Nusselt W. Die Oberflächenkoondensation des Wasserdampfes/ W.Nusselt // Zeitschrift VDI. – 1916. – Bd, 60. – S. 541-546.
3. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении плёнки жидкости/ Г.Гимбутис. – Вильнюс: Мокслас, 1988. – 233 с.
4. Алексеенко С.В. Волновое течение плёнок жидкости/ С.В.Алексеенко, В.Е.Накоряков, Б.Г.Покусаев. – Новосибирск: ВО "Наука", 1992. – 256 с.
5. Ганчев Б.Г. Экспериментальное исследование гидродинамики плёнок жидкости, стекающих под действием силы тяжести по вертикальным поверхностям/ Б.Г.Ганчев, В.М.Козлов, В.В.Лозовецкий, В.М.Никитин // Изв. Вузов СССР. – Серия Машиностроение. – 1970. – № 2.

6. Беседин С.М. Экспериментальные методы исследования волнового течения тонких плёнок жидкости/ С.М.Беседин// Физическая гидродинамика и теплообмен. – 1978. – № 4. – С. 504-511.

7. Семёнов П.А. Течение жидкости в тонких слоях (II)/ П.А.Семёнов// Журн. теор. физ. – 1950. – Т. 20., вып. 8. – С. 980-990.

8. Воронцов Е.Г. О минимальной плотности орошения вертикальных плёночных аппаратов/ Е.Г.Воронцов// ИФЖ.. – 1968. – Т. 14, № 4. – С.1075-1078.

9. Watanabe K. Minimum wetting rate on wetted-wall colum-correlation over wide range of liquid viscosity/ K.Watanabe, T.Munakata, T.Mutsuda// J. Chem. Eng. Japan. – 1975. – Vol, 8., № 1. – P. 75-77.

10. Simon F.F. Thermocapillary induced breakdown of a falling liquid film/ F.F.Simon, Y.Y.Hsu// NASA Techn. Note D-5624, Washington. – 1970. – № 1. – P. 133-138.

Москаленко А.А.¹, Яцевский В.В.¹, Хмяляйнен Л.Т.², Надтока В.Н.³

¹Институт технической теплофизики НАН Украины

²Объединенный институт высоких температур РАН

³Государственное конструкторское бюро "Южное"

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ

Данная статья посвящена решению актуальной проблемы увеличения срока эксплуатации крупногабаритных трубных заготовок специального назначения, подвергающихся циклическим ударным воздействиям на внутреннюю поверхность сверхвысоких температур (2500...3500 °С), давлений (1406...5624 МПа) и механического трения [1]. Решающим фактором в потере работоспособности является эрозия – удаление частичек металла с его внутренней поверхности. Один из наиболее эффективных методов борьбы с эрозией – нанесение защитной плёнки металла повышенной твёрдости (хром и др.) между поверхностью и потоком газов. Нанесение ионно-плазменного защитного слоя хрома на внутреннюю поверхность заготовки спецтрубы должно проводиться при температуре поверхности металла трубной заготовки в преде-

лах 300...350 °С. При этом будет сохранён необходимый уровень сопротивления металла малым пластическим деформациям циклических нагрузок, характеризующийся пределом упругости или коэффициентом пропорциональности.

Однако, в экспериментах, проведенных на трубных заготовках, зафиксирован значительный перегрев в зоне напыления. При перегреве металла понижаются его прочностные свойства (твёрдость, прочность, упругость и т.д.), приобретённые после предшествующей операции финишной термообработки, что негативно скажется на продолжительности его эксплуатации. Для обеспечения высокого качества адгезии защитного покрытия необходимо выполнять требование соблюдения оптимального температурного коридора: от 300 до 350 °С [3].

При постановке задачи данной работы, авто-

рами были учтены как результаты экспериментов на трубных заготовках, так и результаты предыдущих расчётов полей температур с помощью двух компьютерных программ: специализированной (BiLab) [4] и стандартной комплексной – Comsol multiphysics [5]. В программах использовались: адекватные реальному тепловому процессу математические модели, учитывающие как нестационарный характер теплообмена, так и существенную неравномерность распределения температур по длине спецтрубы. Выбор численного метода математического моделирования теплового состояния спецтрубы определялся геометрией трубы и нелинейными (непостоянными во времени и по поверхности) граничными условиями теплообмена. С учётом результатов экспериментов и этих расчетов были внесены изменения в первоначальную конструкцию блока «очиститель-испаритель». Дополнительной возможностью нормализации температурного поля в трубе могло быть увеличение длины модуля источников ионов и плазмы до 400 мм при сохранении мощности неизменной. Результаты расчетов представлены в виде зависимостей температур от времени (рис.1) и от длины (рис.2) фрагмента трубы.

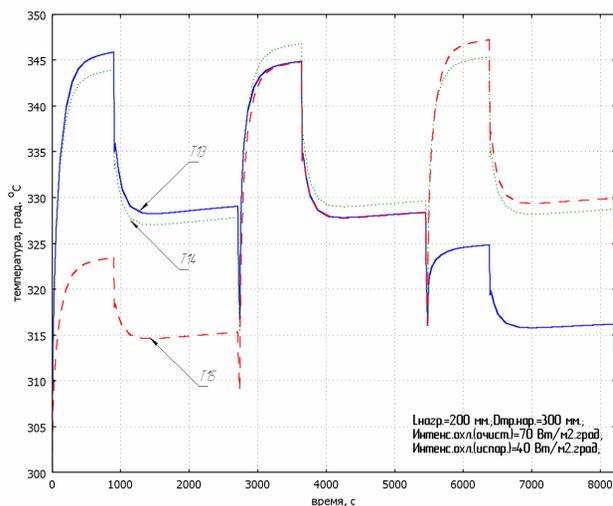


Рис. 1. Зависимость температуры стенки от времени.

Зависимости температуры стенок от длины трубы имеют характерную колоколообразную форму. Максимум температуры находится в районе центра зоны подогрева и перемещается вместе с ним вдоль оси трубы. Более высокие температуры стенки наблюдаются на этапе работы очистителя.

Выполненные, применительно к условиям новых технологий защиты поверхности труб,

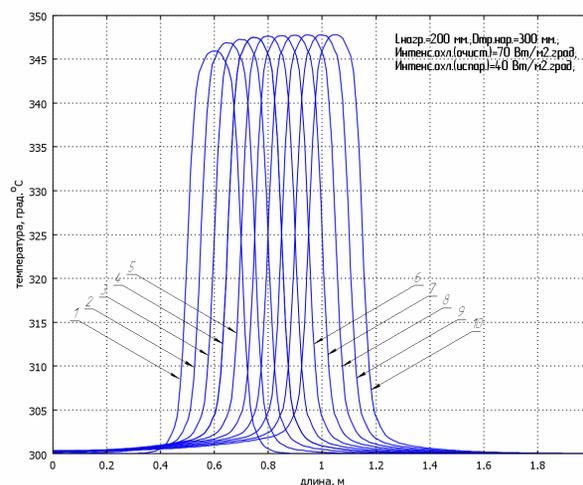


Рис. 2. Зависимость температуры стенки от длины трубы.

работающих в тяжелых эксплуатационных условиях, расчеты температурных режимов металла, позволяют с высокой достоверностью и надёжностью определить оптимальные условия теплообмена, при которых обеспечивается высокое качество нанесенного покрытия. Подводя итоги выполненного исследования, можно сделать следующие выводы.

Выводы

1. При установленных мощности и геометрии системы нанесения защитного покрытия температура металла трубы на 267...280 °С превышает допустимую. Увеличение длины модуля до 400 мм не решает полностью проблему нормализации температуры металла.
2. Соблюдение требований технологии по температуре металла ($T=300...350$ °С) возможно лишь при принудительном, регулируемом отводе тепла с внешней поверхности трубы.
3. На основании обновленной математической модели технологического процесса, для различных диаметров труб и мощностей модулей, рассчитаны необходимые интенсивности охлаждения поверхности, обеспечивающие соблюдение требуемого температурного режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ahmad I. "The problem of gun barrel erosion: an overview" in "Gun propulsion technology", Vol. 109, Progress in Astronautics and Aeronautics, edited by M Summerfield, AIAA, 1988.– P 311-356.
2. Василина В.Г., Надтока В.Н., Зайцев В.И. Экспериментальная установка для нанесения ионно-плазменных покрытий на внутреннюю поверхность труб. Вакуумная техника и техно-

логия. – 2-6т. 16, №1. – С. 83-85.

3. Мовчан В.А., Малащенко И.С. Жаростойкие покрытия, осажденные в вакууме. – Киев, Наукова думка, 1983. – 232 с.

4. Москаленко А.А., Зотов Е.Н., Добри-вечер В.В., Надтока В.Н., Хямялайнен Л.Т. Экспериментально-расчетное определение поля температур полого цилиндра при локальном

внутреннем обогреве. Сборник докладов конференции «Результаты фундаментальных исследований в области энергетики и их практическое значение», Москва, 24-26 марта 2007г. – М.: ОИВТ РАН, «Шанс», 2008. – С.99-105.

5. Бирюлин Г.В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL / FEMLAB. Методическое пособие. – С-Петербург.: ГУ ИТМО, 2006. – 86с.

УДК 532.542:536.252/255:621.314.212

Круковский П.Г., Яцевский В.А., Хуторный В.М.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В МИНИКАНАЛАХ ОБМОТОК СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

От точности расчётов теплового состояния силовых высоковольтных трансформаторов больших мощностей, выполненных в процессе разработки, в значительной степени зависят их технико-экономические показатели, надёжность, качество и конкурентоспособность [1]. Существующие инженерные методы расчёта систем охлаждения трансформаторов не удовлетворяют современным, постоянно растущим запросам промышленности как по точности, так и по диапазонам режимных и конструктивных параметров продукции.

Улучшение технико-экономических параметров и конкурентоспособности силовых маслонаполненных трансформаторов на мировом рынке возможно за счёт повышения их удельных нагрузок и коэффициентов заполнения обмоток, что можно осуществить путём максимального уменьшения и оптимизации размеров охлаждающих каналов, в частности высоты горизонтальных межкатушечных каналов. Поэтому с целью экономии материалов и энергоресурсов производители пытаются выпускать как можно более компактные образцы трансформаторов, что приводит к применению так называемых миниканалов высотой порядка 3 мм и меньше, а также комбинации каналов различной высоты. Важным обстоятельством, требующим учёта при детальном расчётах локальных перегревов, является то, что величина тепловыделений (потерь электрической энергии) в отдельных проводниках по радиальному размеру катушек может значительно (в несколько раз) отличаться в

силу неравномерного распределения радиальной и осевой составляющих индукции магнитного поля, которые вызывают соответствующие вихревые токи и дополнительные потери в проводниках. Детальное исследование гидродинамики и теплообмена в таких миниканалах сегодня можно реализовать посредством расчётов с помощью дву- и трёхмерных CFD-моделей в сопряжённой постановке.

При экспериментальном определении температуры масла термомпарами, устанавливаемыми в разных точках по сечению масляных каналов, получаются изменяющиеся (колеблющиеся) значения температуры даже при установившемся (стационарном) режиме. Это объясняется тем, что наиболее нагретые слои масла находятся очень близко к поверхности обмотки, а места их отрыва случайны. В экспериментах также было обнаружено, что направление движения поперечных потоков масла в горизонтальных каналах в исследованных физических моделях было случайным и менялось от одной серии измерений к другой после охлаждения и повторного нагрева масла. Это говорит о квазистационарном (стохастическом) характере термогидравлических процессов в силовом трансформаторе при естественной системе охлаждения (типа М и Д).

В работе исследовалась компьютерная CFD-модель, представляющая собой фрагмент обмотки высшего напряжения силового масляного трансформатора рис. 1, состоящая из нескольких катушек, помещённых в бак с маслом. Геометрическая модель представляет собой осе-