

УДК 621.039.51.536

Герщуни А.Н., Нищик А.П.

Национальный технический университет Украины „Киевский политехнический институт”

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПЕРЕХОДА К ПАССИВНОМУ ПРИНЦИПУ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИВОДОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

З метою реалізації ефективних пасивних систем охолодження "мокрих" приводів системи управління та захисту проведені експериментальні дослідження, спрямовані на заглушування природної конвекції в кільцевому каналі. Експериментальна апробація запропонованих методів заглушування природної конвекції показала можливість мінімізації аксіального теплопереносу і практично повного усунення нерівномірності температур в каналі.

С целью реализации эффективных пассивных систем охлаждения "мокрых" приводов системы управления и защиты проведены экспериментальные исследования, направленные на подавление естественной конвекции в кольцевом канале. Экспериментальная апробация предложенных методов подавления естественной конвекции показала возможность минимизации аксиального теплопереноса и практически полного устранения неравномерности температур в канале.

A pilot research aimed at suppression of natural convection in an annular channel for the purpose of implementation of efficient passive cooling systems for "wet" drive units of the control and security system has been conducted. The experimental approbation of the proposed methods of suppression of natural convection has demonstrated the possibility of minimization of axial heat transmission and almost complete elimination of temperature non-uniformity inside the channel.

 Q – тепловой поток; t – температура;

СУЗ – система управления и защиты.

Индексы нижние:

отв – отводимый;

подв – подводимый.

Конструктивное исполнение узлов системы управления и защиты ядерного энергетического реактора (СУЗ) может быть различным. Основные различия связаны с двумя вариантами исполнения: "сухим" и "мокрым" [1, 2]. В варианте "мокрого" исполнения стержни-поглотители омываются непосредственно теплоносителем первого контура. Привод и соответствующие механизмы, перемещающие стержни, также работают в среде теплоносителя первого контура и поэтому должны быть герметичными. Основным преимуществом "мокрого" варианта является большая эффективность использования регулирующих стержней. Типичная конструктивная схема такого привода представлена на рис. 1.

Привод включает электродвигатель и приводной механизм, расположенные в герметичном корпусе 1 на крышке реактора, связанном с объемом теплоносителя 2 в реакторе с помощью проходной трубы-стойки 3, системе охлаждения электродвигателя и приводного механизма 4 и 5, управляющий вал-шток

6, установленный с зазором 7 в стойке, и подсоединенный к штоку регулирующий стержень 8. Наличие гарантированного зазора между штоком и стойкой обеспечивает необходимую гидравлическую связь полостей реактора и привода и надежность перемещения рабочего органа в процессе регулирования. Поддержание нормальных температурных условий работы привода осуществляется системой охлаждения, представленной в пределах привода кольцевой рубашкой на стойке, в которой циркулирует охлаждающая вода. В полном объеме система охлаждения имеет разветвленную систему трубопроводов, арматуру, насос, теплообменник и пр.

Надежность работы привода в процессе эксплуатации связана с недопущением возможности перегрева привода и электродвигателя, что весьма сложно обеспечить при использовании активной, многоэлементной системы охлаждения. Переход же на пассивные надежные средства охлаждения возможен лишь при существенном снижении мощности теплопод-

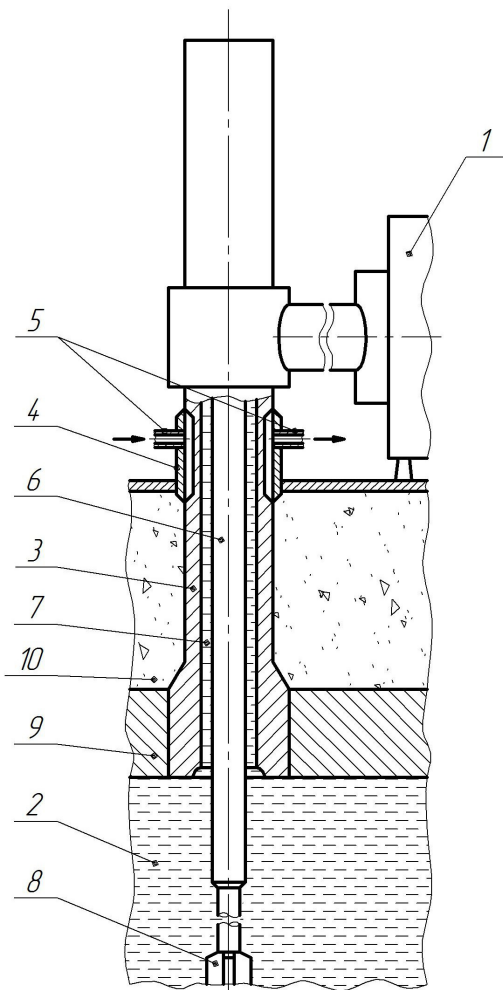


Рис. 1. Конструктивная схема «мокрого» привода. Обозначения: 1 – корпус привода и электродвигателя; 2 – теплоноситель первого контура; 3 – стойка; 4 – рубашка охлаждения; 5 – трубка подвода и отвода охлаждающей воды; 6 – шток; 7 – кольцевой зазор; 8 – регулирующий стержень; 9 – силовая крышка реактора; 10 – биологическая защита.

вода от первого контура к приводу. Вместе с тем, сам принцип «мокрого» привода при верхнем расположении регулирующих органов предполагает наличие развитой естественной конвекции теплоносителя первого контура в зазоре между штоком и стойкой. Следовательно, необходимым условием повышения надежности с обеспечением пассивного охлаждения привода является выработка мер, позволяющих

свести к минимуму естественную конвекцию в зазоре при сохранении условий для беспрепятственного перемещения штока.

В рассматриваемой работе исследование естественной конвекции в кольцевом зазоре и способов воздействия на ее интенсивность проводилось на экспериментальной установке (рис. 2), моделирующей условия работы привода. Объектом исследований является рабочий участок, представляющий собой вертикальную систему соосных труб 1 и 2, изготовленных из нержавеющей стали. Диаметр наружной трубы 57 мм, толщина стенки 5,5 мм. Внутренняя труба имеет наружный диаметр 42 мм при толщине стенки 3 мм. Таким образом, кольцевой зазор в данной системе составляет 2 мм. Равномерность кольцевого зазора по периметру достигнута за счет дистанционирующих выступов, расположенных на внутренней трубе. Внутренняя труба заглушена доньшками с обоих торцов. Опорой внутренней трубы является трубка диаметром 10 мм, расположенная по оси рабочего участка.

Система охлаждения 3 представляет собой теплообменник длиной 100 мм, закрепленный на корпусе наружной трубы. На входном и выходном трубопроводах теплообменника установлены гильзы с термопарами для измерения температур охлаждающей воды. Расход охлаждающей воды определялся с помощью мерного сосуда 4.

В нижней части рабочего участка образована емкость 5, в которой возможно получение равномерного распределения заданных параметров теплоносителя по объему. В качестве теплоносителя используется дистиллированная вода, которая заполняет обогреваемый объем и весь кольцевой зазор. Подвод теплоносителя осуществляется из бака 6, расположенного над питательным насосом 7. Насос соединен с рабочим участком трубопроводом, который входит в нижний фланец наружной трубы и имеет арматуру для слива воды из рабочего участка. Давление в системе контролируется манометром 8. Для удаления воздуха в верхний фланец наружной трубы

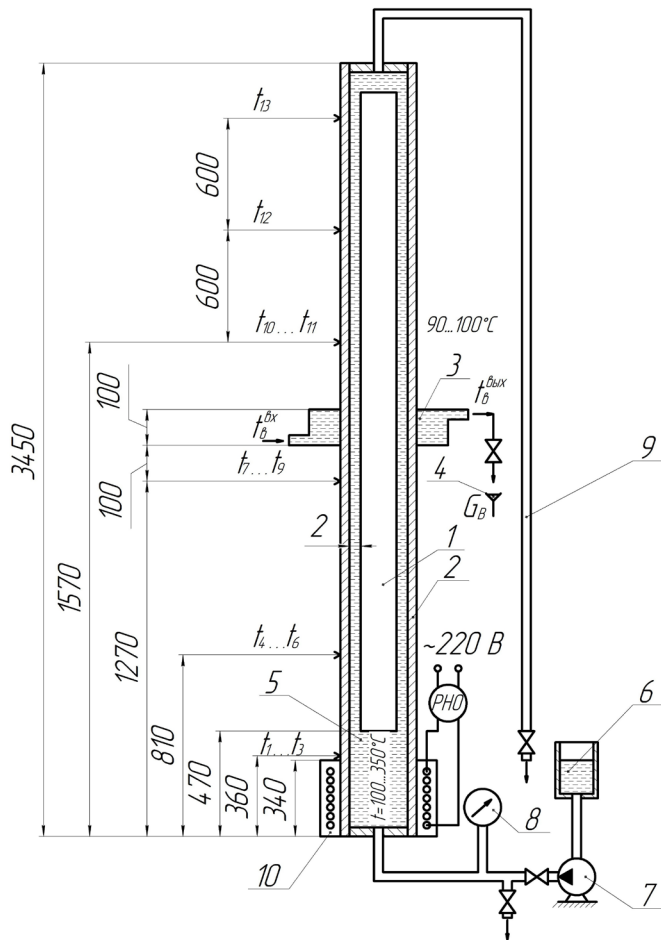


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки.
Обозначения: 1 – имитатор штока; 2 – имитатор стойки; 3 – система охлаждения; 4 – мерный сосуд; 5 – обогреваемый объем теплоносителя; 6 – бак питательной воды; 7 – питательный насос; 8 – манометр; 9 – система воздухоудаления; 10 – омический нагреватель.

вмонтирована трубка с вентилем 9. Тепловая нагрузка подводится к нижней части наружной трубы при помощи омического нагревателя 10. Изменение подводимой нагрузки осуществлялось регулятором напряжения РНО. Измерение подводимой мощности осуществлялось ваттметром. Распределение температуры на рабочем участке определялось при помощи термопар, схема размещения которых дана на

рис. 2. Горячие спаи термопар $t_1 \dots t_{13}$ расположены на внешней поверхности наружной трубы. Для предотвращения потерь теплоты в окружающую среду, нагреватель и корпус наружной трубы покрыты теплоизоляцией.

Исследования проводились в следующей последовательности. После заполнения установки теплоносителем и подъема давления до 16...18 МПа включается нагреватель и ступенчато изменяется подводимая тепловая нагрузка. При этом подается вода в систему охлаждения, и на каждом из установившихся режимов поддерживается заданная допустимая температура стенки на расстоянии 100 мм выше теплообменника на уровне 90...100 °С за счет регулирования расхода охлаждающей воды. С ростом температуры теплоносителя происходит увеличение давления, которое снижается путем удаления части теплоносителя через сливную магистраль. Выход системы на установившийся режим за время, как правило, более 8 часов характеризуется прекращением роста давления теплоносителя внутри рабочего участка. После достижения стационарного режима производится фиксация измеряемых температур, давления в системе, расхода охлаждающей воды и подводимой тепловой мощности. Отводимые тепловые потоки рассчитывались по разности температур охлаждающей воды и ее массовому расходу. Величины подводимого и отводимого тепловых потоков отличаются на величину тепловых потерь в окружающую среду. При достижении температуры в обогреваемом объеме на уровне 340...350 °С, фиксировался последний режим и определялся максимальный отводимый тепловой поток, который переносится естественной конвекцией в кольцевом зазоре. Указанный уровень давления позволял сохранить однофазное течение теплоносителя в кольцевом зазоре.

Во второй части настоящего исследования с целью снижения теплопереноса естественной конвекцией на наружной поверхности внутренней трубы располагались местные гидравлические сопротивления двух типов (рис. 3). Сопротивления первого типа

представляли собой кольца, изготовленные из нихромовой проволоки диаметром 1 мм и приваренные к трубе точечной сваркой. Количество колец составляло в первой и второй сериях опытов 4 и 8 штук соответственно (рис. 3, а и 3, б). Второй тип местных сопротивлений представляет собой заполняющие кольцевой зазор три кольцевые вставки высотой 50 мм каждая, изготовленные из пористого высокопроницаемого металловолоконного материала (рис. 3, в). Исходные структурные параметры: диаметр волокон 30 мкм, длина волокон 3 мм, пористость 75 %. Материал – нержавеющая сталь. Результаты исследования структурных, гидродинамических, капиллярно-транспортных и теплофизических характеристик таких капиллярно-пористых материалов представлены в [3]. Крепление капиллярно-пористых вставок к наружной поверхности внутренней трубы осуществлялось точечной сваркой.

Назначением рассмотренных местных сопротивлений является подавление естественной конвекции в кольцевом зазоре путем разрушения циркуляционных контуров, включающих

подъемные и опускные участки, и, как следствие, снижение передаваемого аксиального теплового потока в верхнюю часть рабочего участка.

Результаты экспериментов представлены на рис. 4. Кривые 1 и 2 характеризуют зависимости подводимого и отводимого тепловых потоков ($Q_{\text{подв}}$ и $Q_{\text{отв}}$) от температуры t в обогреваемой зоне для кольцевого канала без местных сопротивлений. При максимальной температуре ($t = 340...350$ °С) величина отводимого теплового потока составляла 1350...1460 Вт, а подводимый тепловой поток не превышал 1600 Вт. В экспериментах без местных сопротивлений обнаружена неравномерность температур в контролируемых сечениях и температурные пульсации, достигающие $\sim 5...8$ К при частоте $\sim 0,1$ Гц. Данная неравномерность температур характерна для всех исследованных режимов и связана с периодическим смещением восходящих и нисходящих конвективных токов в кольцевом канале. На повышенных и предельных нагрузках наблюдались также пульсации давления в обогреваемом объеме. Величина амплитуды пульсаций давления

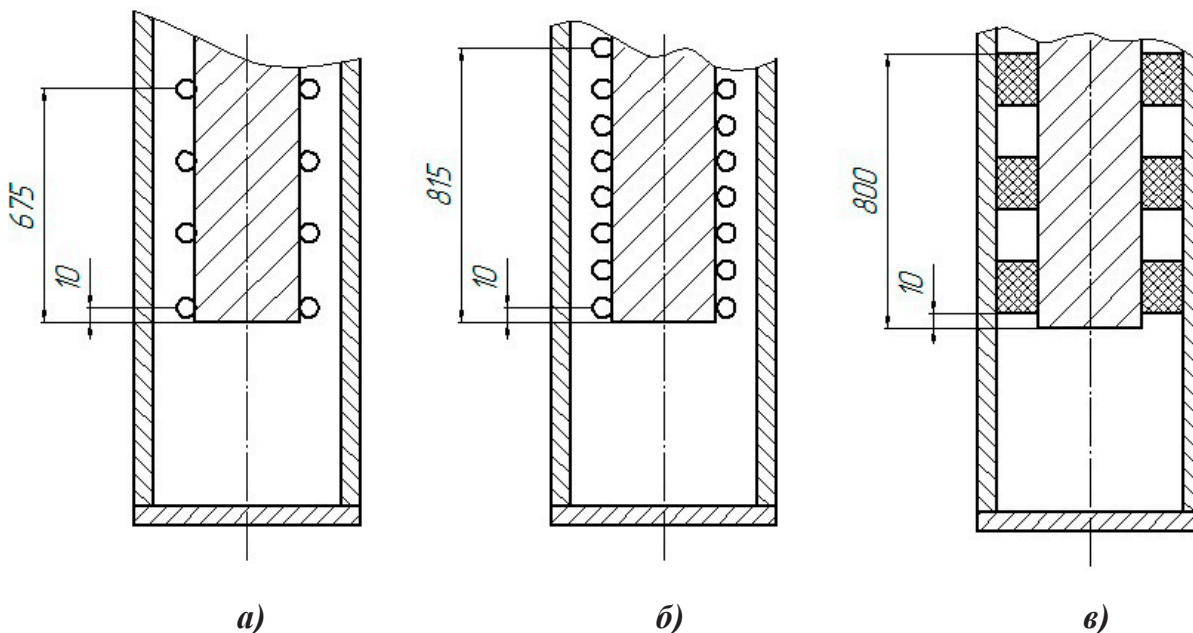


Рис. 3. Схема рабочего участка с местными гидравлическими сопротивлениями: а – четыре кольцевых проволочных сопротивления; б – восемь кольцевых проволочных сопротивлений; в – три кольцевые капиллярно-пористые вставки.

достигала 0,7 МПа. Такие пульсации параметров системы вызваны ее малым объемом и в натуральных условиях не наблюдаются.

Кривые 3 и 4 на рис. 4 отражают зависимость отводимого теплового потока от температуры в обогреваемой зоне для условий нахождения в кольцевом канале кольцевых проволочных местных сопротивлений. Из графиков видно, что установка сопротивлений значительно снижает теплоперенос. Так при четырех кольцевых проволочных сопротивлениях величина отводимого теплового потока на максимальной нагрузке (при $t = 340$ °С) составила ~ 850 Вт, а при восьми сопротивлениях она снизилась до 700 Вт. Также следует отметить, что с установкой таких местных сопротивлений и увеличением их количества амплитуда пульсаций

температуры на рабочем участке значительно снижается. Однако, дальнейшее увеличение числа кольцевых проволочных сопротивлений не является эффективным способом снижения теплопереноса в системе и не оправдано, исходя из конструктивных и технологических соображений.

При наличии трех проницаемых капиллярно-пористых вставок в кольцевом канале наибольшая величина подводимого теплового потока (при $t = 350$ °С) не превышает 250 Вт (кривая 5 на рис. 4). Данный тип местных сопротивлений обеспечил поддержание температуры в контрольном сечении (t_{10}, t_{11}) на уровне не выше 35 °С при отключенной системе принудительного водяного охлаждения. Неравномерность температур по сечениям и пульсации

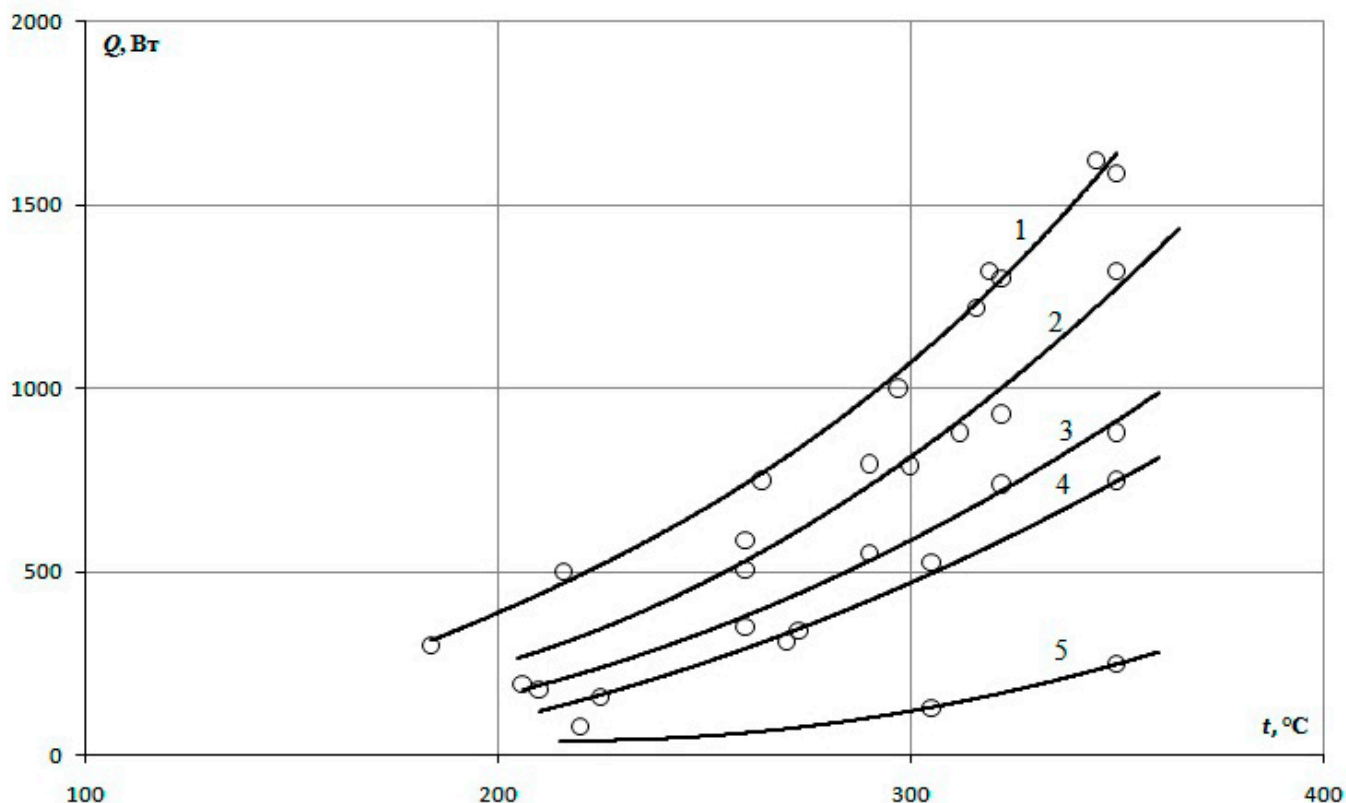


Рис. 4. Зависимости подводимого и отводимого тепловых потоков от температуры в обогреваемой зоне рабочего участка: 1, 2 – кольцевой канал без сопротивлений (1 – $Q_{\text{подв}}$; 2 – $Q_{\text{отв}}$); 3 – $Q_{\text{отв}}$ при четырех кольцевых проволочных сопротивлениях в канале; 4 – $Q_{\text{отв}}$ при восьми кольцевых проволочных сопротивлениях в канале; 5 – $Q_{\text{подв}}$ при трех кольцевых капиллярно-пористых вставках без принудительного охлаждения.

температур практически отсутствуют. Такие результаты свидетельствуют о практически полном подавлении естественной конвекции в кольцевом канале. В данных условиях подводимый тепловой поток балансируется теплопотерями в окружающую среду и незначительным аксиальным теплопереносом, вызванным весьма малоинтенсивной естественной конвекцией и теплопроводностью по стенкам труб.

Были также получены положительные результаты специальных испытаний по изучению износостойкости пористого металловолоконистого материала вставки и надежности ее крепления к несущей цилиндрической поверхности имитатора штока при многократных возвратно-поступательных перемещениях имитатора штока со вставкой внутри трубы, имитирующей стойку.

Предложенные и экспериментально изученные методы подавления естественной конвекции в кольцевом канале позволяют свести к минимуму аксиальный теплоперенос, дают возможность отказаться от использования активных средств охлаждения “мокрых” приводов СУЗ и перейти к пассивным системам отвода незначительных остаточных тепловых потоков. Такими пассивными системами охлаждения могут быть, например, высокоэффективные теплопередающие системы испарительно-конденсационного типа с теплопередающими элементами в виде тепловых труб или двухфазных термосифонов. Поэтому разработка и исследование таких пассивных систем теплоотвода должны быть логическим продолжением и развитием данной работы.

Выводы

1. С целью реализации эффективных пассивных систем охлаждения “мокрых” приводов

СУЗ проведены экспериментальные исследования аксиального теплопереноса естественной конвекцией в кольцевом канале и предложены методы ее подавления при сохранении условий для свободного перемещения движущихся элементов.

2. Экспериментальная апробация метода подавления естественной конвекции путем размещения в канале кольцевых проволочных местных сопротивлений показала возможность снижения передаваемого аксиального теплового потока примерно в 2 раза.

3. Экспериментально показано, что размещение в кольцевом канале местных сопротивлений в виде проницаемых капиллярно-пористых вставок из нержавеющей стали обеспечивает практически полное подавление естественной конвекции и в результате минимизирует аксиальный теплоперенос, неравномерность и пульсации температур.

4. Результаты проведенных исследований расширяют возможности перехода от активных к надежным пассивным системам охлаждения приводов СУЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Африкантов И.И., Митенков Ф.М.* Судовые атомные паропроизводительные установки (Основы проектирования). – Л.: Судостроение, 1965. – 376 с.

2. *Никитюк В.П., Казахмедов А.Г., Ваулин А.С., Ершов И.Т., Денисов В.П.* Приводы СУЗ реакторов ВВЭР для атомных электростанций. – М.: ИКЦ “Академкнига”, 2004. – 325 с.

3. *Семена М.Г., Гершуни А.Н., Зарипов В.К.* Тепловые трубы с металловолоконистыми капиллярными структурами. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1984. – 215 с.

Получено 07.02.2011 г.