

УДК 621.039

Ю.И. Аношкин, А.В. Варенцов, А.О. Куревин, М.А. Легчанов

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В КОНТУРАХ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Предмет, тема, цель работы: Представлены основные результаты расчетного исследования режимов стенда потоковых процессов, целью которого являлось определение параметров теплоотвода в системе охлаждения при естественной циркуляции теплоносителей.

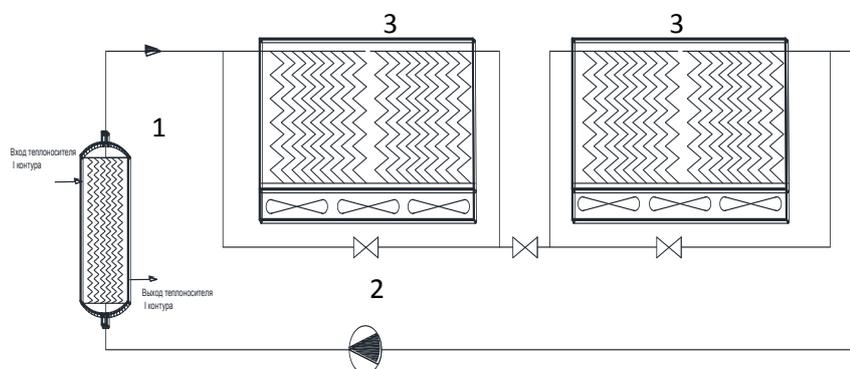
Метод или методология проведения работы: Используя и дополняя методы расчета естественной циркуляции теплоносителя в замкнутом контуре, была разработана методика и программа расчета системы охлаждения стенда потоковых процессов, включая контур отвода тепла в аппаратах воздушного охлаждения.

Результаты и область их применения: В результате исследования (при принятых ограничениях по температурам теплоносителей) определена мощность теплоотвода в контурах системы охлаждения стенда при проектных геометрических параметрах контуров циркуляции. Кроме того, определены оптимальные геометрические и схемные параметры контуров, обеспечивающие максимальный отвод тепла в системе охлаждения стенда при естественной циркуляции теплоносителей. Полученные результаты могут быть использованы при составлении программ экспериментальных исследований, а также при анализе нормальных и аварийных режимов работы стенда.

Выводы: Оптимизация геометрических и схемных параметров контуров системы охлаждения позволяет существенно увеличить мощность теплоотвода системы в режиме естественной циркуляции теплоносителей, что положительно повлияет на энергозатраты и безопасность стенда.

Ключевые слова: контур циркуляции, естественная циркуляция, тепловая мощность, теплообменник, аппарат воздушного охлаждения.

В лаборатории ИЯЭ и ТФ НГТУ им. Р.Е. Алексева ведутся работы по созданию исследовательского стенда потоковых процессов, предназначенного для рассмотрения процессов смешения потоков теплоносителя в РУ ЯЭУ с целью получения экспериментальных данных, необходимых для верификации CFD программ [1]. Стенд позволяет имитировать режимы работы оборудования РУ, включая режимы при высоких параметрах теплоносителя основного контура. В последнем случае для отвода тепла от теплоносителя основного контура предусмотрена система отвода тепла (рис. 1).

**Рис. 1. Схема системы отвода тепла**

В состав системы охлаждения входят:

- теплообменник ХВ-600.00.00 1;
- циркуляционный насос 2;
- два аппарата воздушного охлаждения АВО10-01.00.00 3;
- трубопроводы;
- запорная арматура
- характеристики контуров системы отвода тепла на номинальном режиме стенда приведены в табл. 1.

В теплообменнике тепло от теплоносителя (воды) основного контура стенда передается теплоносителю (тосолу) промежуточного контура системы отвода тепла. В АВО тепло от тосола отводится в окружающий воздух. Циркуляция тосола и воздуха осуществляется циркуляционным насосом и вентиляторами соответственно. Следовательно, обеспечение надежной циркуляции сред в системе отвода тепла требует затрат энергии и бесперебойности её подвода, что делает актуальным вопрос уменьшения затрат энергии при нормальной работе системы и обеспечение отвода тепла в случае частичного или полного обесточивания. Известным и эффективным способом решения этой задачи в энергетике является использование естественной циркуляции. Для решения этой задачи применительно к системе отвода тепла стенда в данной работе проведена расчетная оценка уровня ЕЦ в системе отвода тепла при проектных параметрах и геометрии контуров циркуляции.

Кроме того, проведена оптимизация геометрических параметров контуров системы отвода тепла с целью увеличения отводимого тепла при ЕЦ теплоносителей, а также определена тепловая мощность, отводимая в АВО за счет ЕЦ воздуха при неработающих вентиляторах.

Таблица 1

Характеристики контуров системы отвода тепла

Наименование	Значение
<i>Характеристики греющей среды основного контура</i>	
Теплоноситель	Вода
Температура на входе в холодильник, °С	110
Температура на выходе холодильника, °С	98
Номинальный расход, кг/с	20,83
Номинальная мощность, кВт	1000
<i>Характеристики промежуточного контура охлаждения</i>	
Теплоноситель	Тосол
Поверхность теплообмена холодильника, м ²	28,6
Температура на входе в холодильник, °С	50
Температура на выходе в холодильник, °С	70
Номинальный расход, кг/с	14,66
Диаметр трубопровода, м	0,1
Высота контура, м	4,2
<i>Характеристики воздушного контура</i>	
Теплоноситель	Воздух
Поверхность теплообмена АВО, м ²	588
Номинальный расход, м ³ /с	15

Методика проведения расчетов

Для проведения расчетов режимов с естественной циркуляцией теплоносителя контуров системы охлаждения стенда потоковых процессов в среде программирования MATLAB была разработана расчетная программа Raschot.m. Программа позволяет производить расчет системы отвода тепла при двух вариантах подключения аппаратов воздушного охлаждения: последовательного и параллельного. Расчет мощности системы охлаждения включал в себя последовательное определение тепловой мощности каждого из составляющих контуров в режиме ЕЦ с использованием метода итераций. Блок-схема программы Raschot.m приведена на рис. 2.

Расчет тепловой мощности, отводимой в АВО от промежуточного контура при отключенных вентиляторах, определялся из условия максимальной температуры тосола 90°C , при номинальном его расходе и средней температуре воздуха в июле в месте установки АВО, равной 28°C . Учитывая предполагаемую тепловую изоляцию контуров стенда, потерями тепла в окружающую среду в системе отвода тепла пренебрегали.

Результаты расчетов

Так как в рассматриваемой системе отвода тепла замыкающим является воздушный контур аппарата воздушного охлаждения, максимальная мощность, которую может отвести система отвода тепла стенда в режиме естественной циркуляции теплоносителей, будет определяться уровнем естественной циркуляцией воздуха в АВО. В табл. 2 приведены результаты расчета тепловой мощности, отводимой в АВО при естественной циркуляции воздуха (при неработающих вентиляторах) при штатной циркуляции тосола и температуре окружающего воздуха 28°C .

Таблица 2
Результаты расчета отводимой тепловой мощности
в системе при ЕЦ только в контуре воздуха

Наименование	Значение
<i>Исходные данные</i>	
Высота АВО, м	2,2
Поверхность теплообмена АВО, м^2	588
Атмосферное давление, кПа	100
Температура окружающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$	28
Температура тосола на входе в АВО, $^{\circ}\text{C}$	90
Расход тосола, кг/с	14,6
<i>Результаты расчета</i>	
Коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{с}$	21
Температура воздуха на выходе из АВО, $^{\circ}\text{C}$	85
Температура тосола на выходе из АВО, $^{\circ}\text{C}$	64
Расход воздуха, кг/с	9,1
Мощность контура, кВт	535

Из приведенных результатов расчета видно, что максимальная мощность, отводимая системой от стенда при данных условиях, равна 535 кВт, что составляет 53,5% от номинальной мощности стенда. Кроме того, этот результат указывает на возможность экономии электроэнергии за счет отключения вентиляторов при мощности стенда, не превышающей полученную. Очевидно, что эта максимальная мощность будет возрастать при уменьшении температуры окружающего воздуха.

Поскольку в системе отвода тепла предусмотрена работа двух АВО, то очевидно, что схема подключения их (последовательно или параллельно) будет влиять на гидравлику промежуточного контура, а следовательно, на отводимую тепловую мощность системой при ЕЦ теплоносителя. В табл. 3 приведены исходные данные и результаты расчета отводимой тепловой мощности при последовательном (а) и параллельном (б) подключении АВО при ЕЦ в контурах тосола и воздуха и при проектной геометрии контуров системы.

Таким образом, при номинальных геометрических параметрах контуров системы отвода тепла она способна отвести 73 кВт (при последовательном подключении) и 87,9 кВт (при параллельном подключении), что составляет 7,3 и 8,8 % тепловой мощности стенда соответственно.

С целью анализа оптимальности геометрических параметров контуров системы отвода тепла с точки зрения величины отводимой тепловой мощности при ЕЦ теплоносителей был проведен расчет влияния на эту величину диаметра трубопровода и высоты промежуточного контура циркуляции. Результаты расчета приведены на рис. 3 – рис. 5.

Таблица 3

Результаты расчета отводимой тепловой мощности в системе при ЕЦ во всех контурах отвода тепла при последовательном (а) и параллельном (б) подключении АВО

а)		б)	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
Температура окружающего воздуха, °С	28	Температура окружающего воздуха, °С	28
Температура тосола на выходе из АВО, °С	90	Температура тосола на выходе из АВО, °С	90
Расход тосола, кг/с	1,07	Расход тосола, кг/с	1,31
Расход воздуха, кг/с	6,71	Расход воздуха, кг/с	6,9
Мощность контура, кВт	73,07	Мощность контура, кВт	87,93

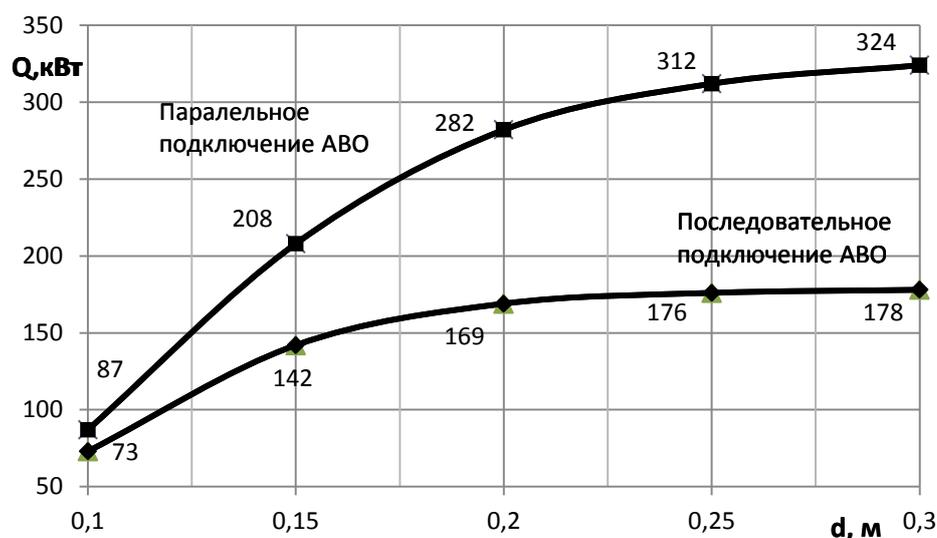


Рис. 3. Зависимость тепловой мощности контура охлаждения от диаметра трубопровода и схемы подключения АВО

Из приведенных на рис. 3 результатов следует, что при увеличении диаметра трубопровода относительно проектного значения существенно возрастает отводимая контуром тепловая мощность при обеих схемах подключения АВО. При этом влияние диаметра трубопровода на отводимую мощность при ЕЦ более существенно при параллельном подключении АВО (в 3,7 раза), чем при последовательном (в 2,4 раза) из-за большего влияния гидравлических потерь трубопровода на гидравлические потери контура в целом. И в том и другом случае, начиная с некоторого диаметра ($d = 0,23$ м, при последовательном подключении АВО и $d = 0,27$ м, при параллельном подключении АВО) влияние диаметра становится незначительным и отводимая тепловая мощность несущественно отличается от максимального значения. Именно эти диаметры трубопровода можно считать оптимальными для соответствующей схемы подключения АВО. Таким образом, увеличивая диаметр трубопровода до оптимального значения, можно увеличить отводимую при ЕЦ тепловую мощность до 175 кВт (17,5% номинальной мощности стенда) и 318 кВт (31,8% номинальной мощности стенда) при соответствующей схеме подключения АВО.

Представленные на рис. 4 результаты показывают, что увеличение эффективной высоты промежуточного контура циркуляции против проектного значения также увеличивает тепловую мощность, отводимую системой при ЕЦ теплоносителей в контурах. Это влияние менее значительное, чем влияние диаметра трубопровода, и также зависит от диаметра трубопровода и схемы подключения АВО. При этом увеличение высоты контура циркуляции до значений более 10 м нецелесообразно, поскольку при росте габаритов системы существенно увеличивается отводимая тепловая мощность не происходит. При этом максимальная отво-

димая тепловая мощность, равная 450 кВт (45% номинальной мощности стенда), может быть получена при оптимальном диаметре трубопровода контура ($d=0,27$ м), высоте контура 10 м и параллельном подключении АВО. Эта тепловая мощность приближается к предельной тепловой мощности, отводимой в АВО при ЕЦ только воздушного контура (535 кВт).

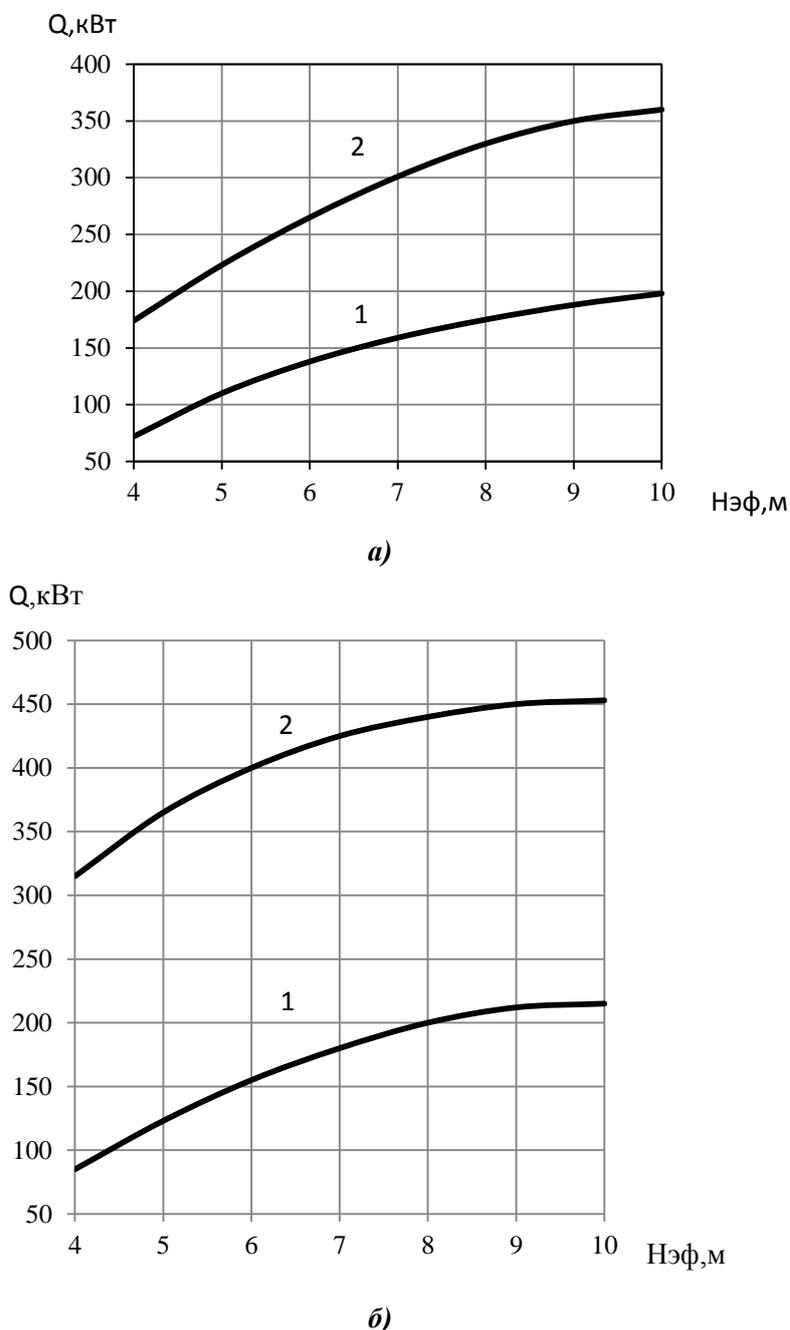


Рис. 4. Зависимость тепловой мощности контура охлаждения от высоты контура ЕЦ при проектном (1) и оптимальном (2) диаметре трубопровода контура: а – последовательном подключении АВО; б – при параллельном подключении АВО

Выводы:

1. Результаты проведенных расчетных исследований позволяют определить тепловую мощность системы отвода тепла стенда потоковых процессов при проектных параметрах контуров в условиях ЕЦ теплоносителей, а также выбрать оптимальные геометрические характеристики промежуточного контура, с целью получения максимальной отводимой тепловой мощности системы отвода тепла в целом.

2. Максимальная тепловая мощность, отводимая в АВО при ЕЦ только в воздушном контуре, полученная при средней температуре самого жаркого месяца в месте установки стенда, равна 535 кВт, что составляет 53,5% номинальной мощности стенда. Этот результат позволяет оценить возможную экономию энергопотребления при работе вентиляторов за счет регулирования мощности или отключения их электродвигателей.

3. При проектных геометрических характеристиках промежуточного контура тепловая мощность системы отвода тепла при ЕЦ теплоносителей составляет 7,3% от номинальной мощности стенда.

4. При оптимальных геометрических характеристиках промежуточного контура максимальная тепловая мощность системы отвода тепла при ЕЦ теплоносителей может быть увеличена до 45% от номинальной мощности стенда, что близко к максимальной тепловой мощности, отводимой в АВО при ЕЦ воздуха. Такое существенное увеличение мощности системы теплоотвода в режиме ЕЦ теплоносителей, безусловно, положительно повлияет на энергозатраты и безопасность стенда.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 03 декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. **Техническое задание** на экспериментальный стенд для исследования процессов смешения потоков теплоносителя в моделях реактора РИТМ-200, утвержденное 10.12.2014 г.
2. **Терентьев, В.Д.** Основы тепловых и гидравлических расчетов судовых ядерных реакторов и парогенераторов / В.Д.Терентьев, Н.М. Синев. – Ленинград: Судостроение, 1967. – 208 с.
3. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 180 с.
4. **Бойко, Е.А.** Расчёт естественной циркуляции в контурах барабанных котлов: учеб. пособие / Е.А. Бойко, И.С. Деринг, Т.И. Охорзина. – Красноярск, 2006. – 47 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2016*

Y.I. Anoshkin, A.O. Kurevin, M.A. Legchanov

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF GRAVITY COOLANT CIRCULATION MODES IN THE COOLING CIRCUITS OF THE FLOW PROCESSES RESEARCH STAND

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Subject, theme, objective: Presents the main results of computational study the modes of flow processes stand, the purpose of which was to determine parameters of heat removal in the cooling system with gravity coolant circulation.

Method of work: Using and complementing the calculation methods of gravity coolant circulation in closed circuit, we developed a method and program for calculating the cooling system of the flow processes stand, including the heat removal circuit in air coolers.

Results and field of application: If adopted restrictions on coolant temperature, as a result of the study, it was determined heat removal capacity in the circuits of cooling system of the stand, when the geometric design parameters of the circuits. In addition, there were determined the optimal geometrical and circuit parameters of the circuits, that provide the maximum heat removal in the cooling system of the stand with gravity coolant circulation.

The results can be used in the programming of experimental studies and also it can be applied in the analysis of normal and emergency modes of operation of the stand.

Conclusions: Optimization of the geometrical and circuit parameters of the cooling system circuits can significantly increase the heat removal capacity of the system in the gravity coolant circulation mode, that have a positive impact on the energy consumption and the safety of the stand.

This work has been carried out with support of the Ministry of Education and Science of Russian Federation within the bounds of contract № 02.G25.31.0124 03/12/2014 (Government Regulation № 218 from 09/04/2010)

Key words: Circuit, gravity circulation, thermal capacity, heat exchanger, air cooler.