

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ УСТАНОВКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ВНЕШНЕГО КОНТУРА ОХЛАЖДЕНИЯ АЭС

CALCULATION OF A HEAT EXCHANGER FOR A SIMULATION INSTALLATION OF PROCESSES IN THE EXTERNAL COOLING CIRCUIT SYSTEM OF A NUCLEAR POWER PLANT

Федорова О.А., преподаватель СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Fedorova O.A., College teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Федоров Д.М., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Fedorov D.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Савенко Е.С., преподаватель СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Savenko E.S., College teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В данной статье рассматривается возможность модернизации установки моделирования процессов в системе внешнего контура охлаждения АЭС путем замены блока теплообменников на пластинчатый теплообменник. В результате конструктивного и гидравлического анализа был рекомендован теплообменник с 33 пластинами, работающий по принципу противоточности сред, что позволяет достичь требуемых параметров работы установки. Достигнуто соответствие эксплуатационным режимам, а также оптимальные размеры и конфигурация поверхности теплопередачи. Подтверждена эффективность выбранной конструкции теплообменного аппарата, его характеристик и наличие запаса по теплообменной поверхности.

Ключевые слова: установка моделирования процессов, пластинчатый теплообменник, удельный тепловой поток, коэффициент теплопередачи, контур.

Abstract. This article discusses the possibility of upgrading the setup for modeling processes in the external cooling loop of a nuclear power plant by replacing the heat exchanger unit with a plate heat exchanger. As a result of the design and hydraulic analysis, a heat exchanger with 33 plates operating on the principle of counter-current media was recommended, which allows achieving the required operating parameters of the setup. Compliance with operating modes, as well as optimal dimensions and configuration of the heat transfer surface were achieved. The efficiency of the selected design of the heat exchanger, its characteristics and the presence of a reserve on the heat exchange surface were confirmed.

Key words: process simulation unit, plate heat exchanger, specific heat flux, heat transfer coefficient, circuit.

Введение

В современных условиях энергоснабжения безопасность и эффективность атомных электростанций играют решающую роль в оценке надежности энергосистемы в целом. Образование накипи и биоотложений не допускается, так как это может существенно ухудшить работу открытых систем охлаждения. Реагенты, препятствующие этим процессам, становятся необходимым условием обеспечения надежной и бесперебойной работы оборудования.

Установка моделирования процессов (УМП) является современным инструментом, который может быть использован для детального анализа и оценки эффективности реагентов в открытых системах охлаждения атомных электростанций. Растущие требования к надежности и производительности системы охлаждения, а также соответствие отраслевым стандартам требуют проведения модернизации. В частности, одной из ключевых задач совершенствования установки является обновление блока теплообменников. В связи с этим замена традиционного теплообменника на пластинчатый теплообменник может стать важным шагом на пути к реальному достижению требуемого уровня производительности и надежности системы.

Анализ принципа работы и теплового баланса установки моделирования процессов в градирне

Установка моделирования процессов в градирне состоит из двух контуров – внутреннего и внешнего. Внутренний контур состоит из котельной установки и теплообменника, тепло котла передается во внешний контур через теплообменник. Внешний контур состоит из теплообменника и модельной градирни, вода из теплообменника принимает тепло от внутреннего контура и охлаждается на градирне.

Принципиальная схема установки для моделирования схематично представлена на рисунке 1, расшифровка обозначений представлена в таблице 1.

Закрытый оборотный цикл состоит из котла мощностью 70 кВт с системой поддержания температуры, буферной емкости, циркуляционного насоса. Вода закрытого цикла охлаждается на блоке теплообменников. Встроенная электроника котла поддерживает постоянную температуру воды на выходе из котла. Котловая вода охлаждается на пластинчатом теплообменнике, который необходимо подобрать для поддержания параметров температуры в установке.

Циркуляционный насос, открытого обратного цикла, направляет охлажденную воду после градирни на блок дозирования и контроля. Вентилем К-4 обеспечивается необходимая скорость потока воды в блоке дозирования и контроля. Далее вода проходит через пластинчатый теплообменник, и нагретая вода направляется на градирню. Подпитка системы осуществляется из бака подпиточной воды по открытию, закрытию клапана.

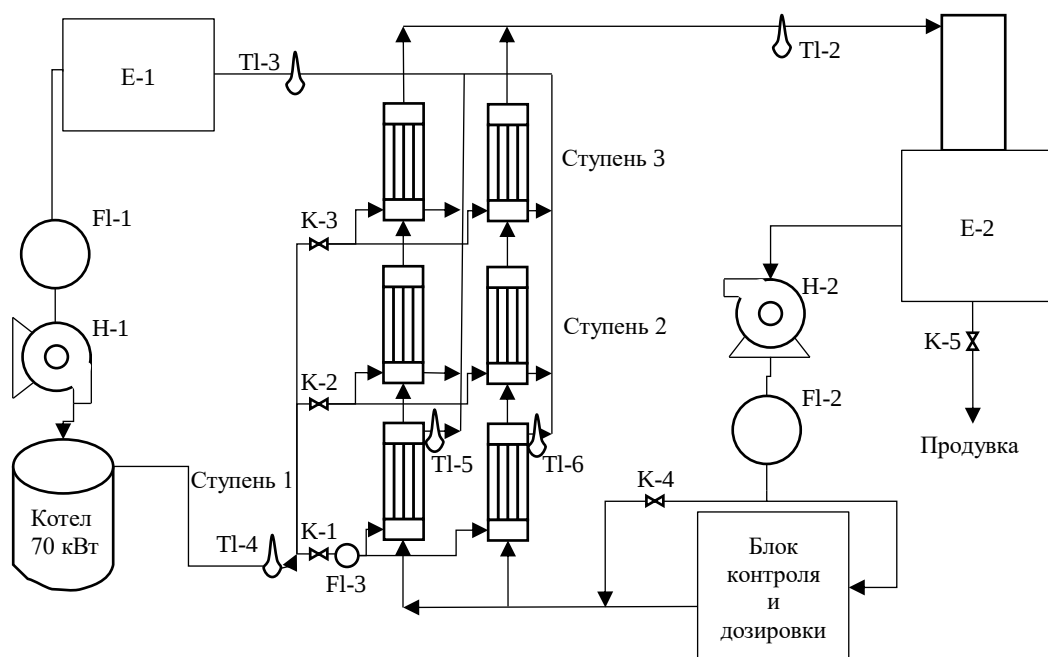


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для моделирования

Таблица 1 – Расшифровка обозначений к рисунку 1

E-1	Буферная емкость внутреннего контура, 1000
E-2	Бассейн градирни, 700 л тез
FI-1	Расходомер внутреннего контура
FI-2	Расходомер внешнего контура
K-1, K-2, K-3	Клапаны регулировки (электромагнитные)
TI-3	Датчик температуры холодной воды внутреннего контура
TI-4	Датчик температуры нагретой воды внутреннего контура
TI-5, TI-6	Датчики температуры охлаждённой воды внутреннего контура первой ступени теплообменников
N-1	Циркуляционный насос внутреннего контура (до 7000л/час)
N-2	Циркуляционный насос внешнего контура (3000 л/час)

Блок теплообменников представляет собой теплообменный аппарат пластинчатого типа, который обеспечивает заданные температуры в установке и удельный тепловой поток менее 2 Вт/ см².

Рассмотрим принцип работы установки. В первом контуре количество тепла, вырабатываемое котельным агрегатом, зависит от температуры на выходе из котла и задается автоматикой. После котла нагретая вода попадает в пластинчатый теплообменник, отдавая тепло во второй контур. После теплообменника охлажденная вода возвращается на нагрев в котел.

Во втором контуре нагретое рабочее тело после теплообменника идет на охлаждение в градирную установку для дальнейшего охлаждения до целевой температуры открытого

контура. Температура охлажденной воды поддерживается регулированием оборотов вентилятора с помощью ПЧВ-1 (Рис. 1).

По исходным данным перепад температур воды на входе и на выходе из градирни составляет 15°C. Необходимо найти режим работы установки, в котором будет соблюдаться тепловой баланс установки, теплота, отдаваемая котельным оборудованием первому контура, должна совпадать с теплотой, отдаваемой теплоносителем через градирню в окружающую среду.

Результаты расчета теплового баланса в зависимости от начальной температуры после котельного агрегата и расходов в закрытом и открытом контурах и теплоперепада на градирне, с параметрами: температуре охлаждаемого теплоносителя 35°C, температура нагреваемого теплоносителя 50 °C представлены в таблице 2 [2, 5].

Таблица 2 – Результаты теплового баланса в зависимости от температуры после котельного агрегата и заданном расходе

Параметры	При расходе $G_1 = 0,53 \text{ кг/с}$				При расходе $G_1 = 0,7 \text{ кг/с}$				При расходе $G_1 = 0,91 \text{ кг/с}$			
Температура после котельного агрегата, °C	60	70	80	90	60	70	80	90	60	70	80	90
Температура 1 контура после теплообменника, °C	36	46	56	66	42	52	62	72	46	56	66	76
Теплота, выделяемая котельным агрегатом и отдаваемая градирней, кВт	52											

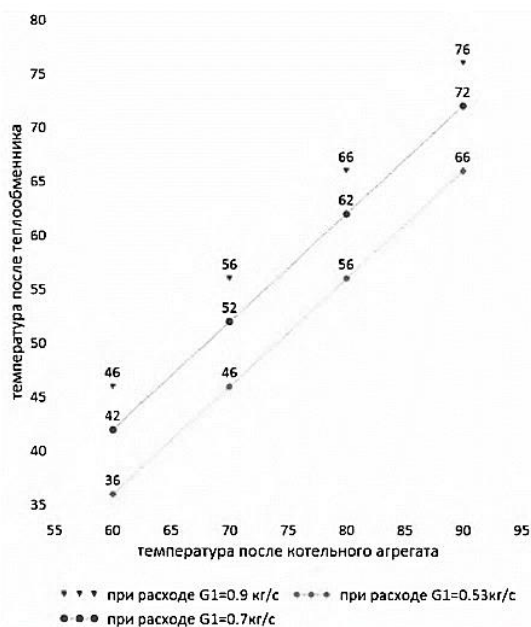


Рисунок 2 – График зависимости температуры теплоносителя после теплообменника в первом контуре от температуры после котельного оборудования и расхода в первом контуре

Из графика видно, что при повышении температуры после котельного агрегата, при неизменных параметрах во втором контуре, температура после теплообменника также

повышается и имеет линейную зависимость, а также и при повышении расхода в первом контуре температура возрастает.

Результаты расчета для случая соблюдения рекомендованных параметров. В таблицах 3-5 представлены параметры рабочих сред и теплообменника при различных перепадах температуры на градирни при различных расходах воды [1].

Рассмотрим пластинчатый теплообменник с числом пластин 33 шт. и площадью 4,2 м².

Таблица 3 – Результаты расчетов для теплообменника при различных перепадах температур на градирни ($G_1 = 0,53$ кг/с)

Параметр	Перепад температур											
Перепад на градирни, ΔT , °C	15				10				13			
Расход 1 контур, к/с	0,53											
Расход 2 контур, к/с	0,833											
Температура после котла, °C	58	59	60	61	54	56	58	59	56	57	58	59
Температура до теплообменника 2 контур, °C	32				37				34			
Температура после теплообменника 2 контур, °C	47											
Количество энергии передаваемый в теплообменнике, кВт	52,2				34,8				45,25			
тепловой поток, Вт/см²	1,49	1,8	2,1	2,38	0,889	1,496	2,057	2,332	1,12	1,44	1,742	2,03
Эффективная площадь, м²	3,49	2,89	2,48	2,18	3,91	2,327	1,69	1,49	4	3,138	2,59	2,229
Коэффициент запаса, %	18,8	43,4	66,86	89,69	5,95	78,33	145	177	2,87	32,2	59,7	86,2
Коэффициент теплопередачи Вт/м²·K	2628,6	2633,7	2640,4	2642,9	2646,5	2656,1	2671,3	2677,2	2648,9	2657,5	2665,9	2675,6
Гидравлическое сопротивление греющего теплоносителя, Па	4844,4	4804,4	4764,4	4754,4	4793	4753	4723	4703	4721,1	4702,55	4684,6	4666,2
Температура после теплообменника 1 контур, °C	34,2	35,4	36,42	37,42	38,2	40,2	42,2	43,2	35,5	36,5	37,5	38,5
Гидравлическое сопротивление нагреваемого теплоносителя, Па	10394,1	10394,1	10394,1	10394,1	10403,3	10403,3	10403,3	10403,3	10641,9	10641,9	10641,9	10641,9

Таблица 4 – Результаты расчетов для теплообменника при различных перепадах температур на градирни ($G_1 = 0,7$ кг/с)

Параметр	Перепад температур									
Перепад на градирни, ΔT , °C	15				10			13		
Расход 1 контур, к/с	0,7									
Расход 2 контур, к/с	0,833									
Температура после котла, °C	53	54	55	56	51	53	55	53	55	56
Температура до теплообменника 2 контур, °C	32				37			34		
Температура после теплообменника 2 контур, °C	47									
Количество энергии передаваемый в теплообменнике, кВт	52,2				34,8			45,25		
Тепловой поток, Вт/см²	1,29	1,59	1,89	2,194	0,864	1,46	2,05	1,359	1,96	2,26
Эффективная площадь, м²	4	3,26	2,753	2,38	4	2,3	1,69	3,3	2,309	2
Коэффициент запаса, %	1,98	27	50,7	74,3	3	77,2	144,9	24,6	79,79	107,3
Коэффициент теплопередачи Вт/м²·K	2901,1	2908,7	2916,2	2920,8	2958,6	2979	2996,6	2918,8	2930,2	2937,6
Гидравлическое сопротивление греющего теплоносителя, Па	7882,8	7874,2	7852,6	7820,8	7799,1	7645,9	7884,4	7865,8	7845,5	7839,7
Температура после теплообменника 1 контур, °C	35,1	36,1	37,1	38,1	39	41	43	37,5	39,5	40,5
Гидравлическое сопротивление нагреваемого теплоносителя, Па	10487,3	10487,3	10487,3	10487,3	10445	10445	10445	10384,6	10384,6	10384,6

Таблица 5 – Результаты расчетов для теплообменника при различных перепадах температур на градирни ($G_1 = 0,9$ кг/с)

Параметр	Перепад температур								
Перепад на градирни, ΔT , °C	15			10			13		
Расход 1 контур, к/с	0,9								
Расход 2 контур, к/с	0,833								
Температура после котла, °C	51	52	53	50	52	53	50	51	53
Температура до теплообменника 2 контур, °C	32			37			34		
Температура после теплообменника 2 контур, °C	47								
Количество энергии передаваемый в теплообменнике, кВт	52,2			34,8			45,25		
Тепловой поток, Вт/см²	1,43	1,756	2,1	1	1,7	2,05	1,05	1,38	2,07
Эффективная площадь, м²	3,64	2,9	2,5	3,2	2,02	1,69	4,12	3,24	2,15
Коэффициент запаса, %	13,9	39,5	35,2	27,8	105,4	144,5	0,6	27,8	92,7
Коэффициент теплопередачи Вт/м²·K	3160,3	3169,9	3178,6	3193,9	3212,7	3221,7	3170,2	3180,7	3205,32
Гидравлическое сопротивление греющего теплоносителя, Па	12237,4	12227,3	12214,4	12103,5	1260,5	1230,4	12181,9	12149,9	12120,8
Температура после теплообменника 1 контур, °C	37,1	38,1	39	40,7	42,7	43,7	37,9	38,9	40,9
Гидравлическое сопротивление нагреваемого теплоносителя, Па	10487,3	10487,3	10487,3	10441,9	10441,9	10441,9	10485,2	10485,2	10485,2

Из данных режимов необходимо выбрать оптимальный режим работы установки моделирования, при котором соблюдались следующие условия [3]:

- тепловой поток на пластинчатом теплообменнике не должен превышать 2,12 Вт/см².
- так же для соблюдения теплового баланса необходимо чтобы теплота, выводимая из системы не превышала 70 кВт, так как котел зная установка не сможет поддерживать систему в равновесном состоянии.

В таблице 6 представлены режимы работы установки с соблюдением исходных условий работы. В таблице 7 приведены параметры установки моделирования после настройки системы и проверки технических параметров.

Таблица 6 – Режимы работы установки с соблюдением исходных условий

Режимы	1 режим		2 режим	
Контур	Горячий контур	Холодный контур	Горячий контур	Холодный контур
Расход, т/ч	1,90	2,98	1,90	2,98
Температура на входе, °C	60	32	63	32
Температуры на входе, °C	36,47	47	34,8	50
Тепловая нагрузка, кВт	51,8		62,6	
Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² ·K	2614		2652	
Тепловой поток, Вт/см ²	2,12		1,78	

Таблица 7 – Технические параметры УМП после ввода в эксплуатацию

Режимы	1 режим		2 режим	
Контур	Горячий контур	Холодный контур	Горячий контур	Холодный контур
Расход, т/ч	7,2	3,6	7,2	3,6
Температура на входе, °С	55-60	45-51	59	41,3
Температуры на входе, °С	60-65	36-41	64	51,2

Теплообменник обеспечивает требуемые диапазоны теплогидравлический параметров работы установки. Проведенный расчет подтвердил правильность выбранной конструкции теплообменника, его характеристик и запаса по теплообменной поверхности [4].

Заключение

В результате поверочного расчета пластинчатого теплообменника, (для оптимального режима работы, параметры которого представлены в таблице 7) были получены следующие основные результаты:

1. Коэффициент запаса ПТ составляет 564%, что позволяет использовать теплообменник в широком диапазоне значений температур и расходов теплоносителей, а также избежать снижения эффективности теплообмена с течением времени из-за загрязнения, окисления поверхности теплообмена.

2. Удельный тепловой поток в экспериментальных режимах составил, 1 Вт/см^2 , это позволяет избежать солеотложения и коррозии в ПТ, что в свою очередь увеличивает срок эксплуатации теплообменного оборудования, а также поддержание эффективности теплообмена в течении длительного времени эксплуатации. Также, по условиям задачи, тепловой поток на пластинчатом теплообменнике не должен превышать $2,12 \text{ Вт/см}^2$.

3. Коэффициент теплопередачи составил 4436 Вт/(м·К) .

4. В диапазоне мощности электрического котла до 70 кВт, значения теплогидравлических параметров УМП не превышают расчетных значений, полученных во время конструкционного расчета.

Пластинчатый теплообменник соответствует требованиям эксплуатационных режимов работы установки УМП, а также обеспечивает оптимальную по размерам и конфигурации поверхность теплопередачи. На основании результатов конструктивного и гидравлического расчетов необходимо выбрать теплообменник с 33 пластинами, с противоточным движением сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 24.035.05-89 «Методические указания. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС».
2. Организация и проведение модернизации систем и оборудования атомных станций. Стандарт организации. СТО 1.1.1.04.003.0542-2019. – Москва: АО «ВНИИАЭС», 2020. – 150 с.

3. Теплообменное оборудование для атомных электростанций. Технические требования эксплуатирующей организации. СТО 1.1.1.01.001.0889-2013. – Нижний Новгород: ООО «НЭЦЯТ», 2021. – 30 С.

4. Моряшов, А.А. Тепломассообменные процессы и установки: Методические указания / А. А. Моряшов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014 г. – 28 с.

5. Ведерникова, М.И. Расчет пластинчатых теплообменников: методические указания / М.И. Ведерникова, В.С. Таланкин. – Екатеринбург, 2018 г. – 29 с.

REFERENCES

1. RD 24.035.05-89 «Methodological guidelines. Thermal and hydraulic calculation of heat exchange equipment of NPPs».

2. Organization and implementation of modernization of systems and equipment of nuclear power plants. Organization standard. SТО 1.1.1.04.003.0542-2019. – Moscow: JSC «VNIIAES», 2020. – 150 p.

3. Heat exchange equipment for nuclear power plants. Technical requirements of the operating organization. SТО 1.1.1.01.001.0889-2013. – Nizhny Novgorod : ООО «NNECNT», 2021. – 30 p.

4. Moryashov, A.A. Heat and mass transfer processes and installations: Methodological guidelines / A.A. Moryashov. – Kazan: Kazan. state energy. un-t, 2014 – 28 p.

5. Vedernikova, M.I. Calculation of plate heat exchangers: guidelines / M.I. Vedernikova, V.S. Talankin – Ekaterinburg, 2018 – 29 p.