

УДК 621.039

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЭС С БРЕСТ-300 ПОСРЕДСТВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Макаров С.А. (АО «Прорыв», г. Москва)

e-mail: mca@proryv2020.ru

Для повышения доли атомной энергии в электроэнергетике страны необходимы высокоэффективные АЭС средней мощности. Наиболее эффективное использование топлива в системах преобразования тепловой энергии в механическую, затем в электрическую является первостепенной задачей в энергетике. Актуальными остаются вопросы повышения к.п.д. ТЭС и в особенности АЭС, в которых максимальная температура теплоносителя в первом контуре ограничена требованиями безопасности. Для АЭС с водо-водяными и кипящими реакторами максимальная температура теплоносителя ограничена допустимой температурой оболочек твэлов, которая определяет температуру теплоносителя как близкую или равную температуре кипения теплоносителя. Последняя, в свою очередь, определяет давление в первом контуре. Из-за ограничений температуры первого контура, в основном, АЭС с РБМК и ВВЭР в тепловых схемах турбоустановки максимальная температура рабочего тела перед турбиной невысокая, что ограничивает возможности получения к.п.д. на уровне ТЭС, а также приводит к использованию конденсационных турбин.

В настоящей статье представлена принципиальная тепловая схема турбоустановки с тепловым газовым котлом — органический электрический станция (ОЯЭС), разработанная для реакторной установки БРЕСТ-300. Тепло, получаемое в газовом котле при сжигании органического топлива, используется для начального и промежуточного перегрева рабочего тела перед цилиндрами турбины, а также для предварительного подогрева воздуха, подаваемого в котел. В такой схеме внутренний к.п.д. цикла составляет 54,12%.

Цель настоящей работы — получение наибольшего к.п.д. энергоблока АЭС с дополнительным источником тепловой энергии, т.е. разработка и оптимизация принципиальной тепловой схемы турбоустановки. При решении этой задачи рассматривались разные варианты тепловой схемы с использованием дополнительного источника энергии, получаемой при сжига-

нии органического топлива природного газа. Основные параметры органического топлива следующие:

Удельная теплота сгорания, МДж/кг . . .	44
Расход в камере сгорания, кг/с . . .	5,91
Удельный расход органического топлива на единицу энергии:	
массовый, г/(кВт·ч) . . .	82
объемный, м ³ /(кВт·ч) . . .	0,113

Основные параметры греющего газа следующие:

Мощность $N_{т\text{ газ}}$, МВт . . .	260,2
Расход, кг/с . . .	176
Давление, МПа . . .	0,1
Температура на входе в ППГ-1, ППГ-2, °С . . .	1320
Температура на входе в вентиляционную трубу, °С . . .	154,8
Мощность, отводимая в окружающую среду, МВт (%) . . .	30,84(11,85)
Эффективность использования газа $(N_э - 300 \text{ МВт})/N_{т\text{ газ}}$, отн. ед. . . .	0,84

*Мощность ОЯЭС: $N_э$ — электрическая, $N_{т\text{ газ}}$ — тепловая.

Дополнительный источник тепла позволяет использовать в составе тепловых схем газовые турбины, а также существенно повысить температуру рабочего тела перед цилиндрами паротурбинной установки [1—3]. В ходе поисковых работ для энергоблоков ОЯЭС с реакторной установкой БРЕСТ-300 предпочтение отдано вариантам тепловых схем без газовых турбин. В разработанной схеме за счет сжигания природного газа повышается начальная температура рабочего тела перед цилиндрами турбоустановки, а также предварительно подогревается воздух, подаваемый в топку котла. Окончательный подогрев воздуха осуществляется в паровом подогревателе. Для энергоблока ОЯЭС были рассмотрены два варианта тепловой схемы с использованием:

в первом варианте теплообменного газового оборудования корпусного типа, т.е. газовых пароперегревателей и теплообменников для час-

точного подогрева питательной воды, а также компрессора для прокачки греющего газа по тракту газовой части контура;

во втором варианте традиционного котлового оборудования типа ТЭС и ТЭЦ для перегрева пара и подогрева воздуха.

В первом варианте тепловой схемы с теплообменным газовым оборудованием корпусного типа не удалось добиться повышения к.п.д. выше 50%. Поэтому второй вариант тепловой схемы турбоустановки с котловым оборудованием газового контура выбран как конечный.

Конденратно-питательный тракт по структуре не отличается от типовых схем, применяемых для АЭС. В ходе работ были рассмотрены разные по составу теплового оборудования варианты конденратно-питательного тракта.

В настоящей статье представлен вариант типовой схемы ОЯЭС, в которой в качестве источников тепловой энергии используется два вида топлива: ядерное, сжигаемое в активной зоне реакторной установки, и органическое — природный газ, сжигаемый в топке газового котла.

Принципиальная тепловая схема ОЯЭС с реакторной установкой БРЕСТ-300 показана на рисунке. Основные параметры ОЯЭС и АЭС с БРЕСТ-300 приведены в табл. 1, параметры насосов конденратно-питательного тракта ОЯЭС и турбин — в табл. 2, 3.

Таблица 1. Основные параметры ОЯЭС и АЭС с БРЕСТ-300

Параметр	ОЯЭС	АЭС с БРЕСТ-300
Мощность, МВт:		
тепловая	960,2	700
электрическая	519,6	300
Источники тепловой энергии	Ядерное топливо + природный газ	Ядерное топливо
Отношение мощностей, отн. ед.:		
$700 \text{ МВт}/N_T$	0,73	1
$300 \text{ МВт}/N_3$	0,58	1
Внутренний к.п.д. цикла, %	54,12*	43
*С учетом расхода электроэнергии на прокачку теплоносителя по конденратно-питательному тракту с к.п.д. насосов 80% снижается до 51,16%.		

Таблица 2. Параметры насосов конденратно-питательного тракта ОЯЭС

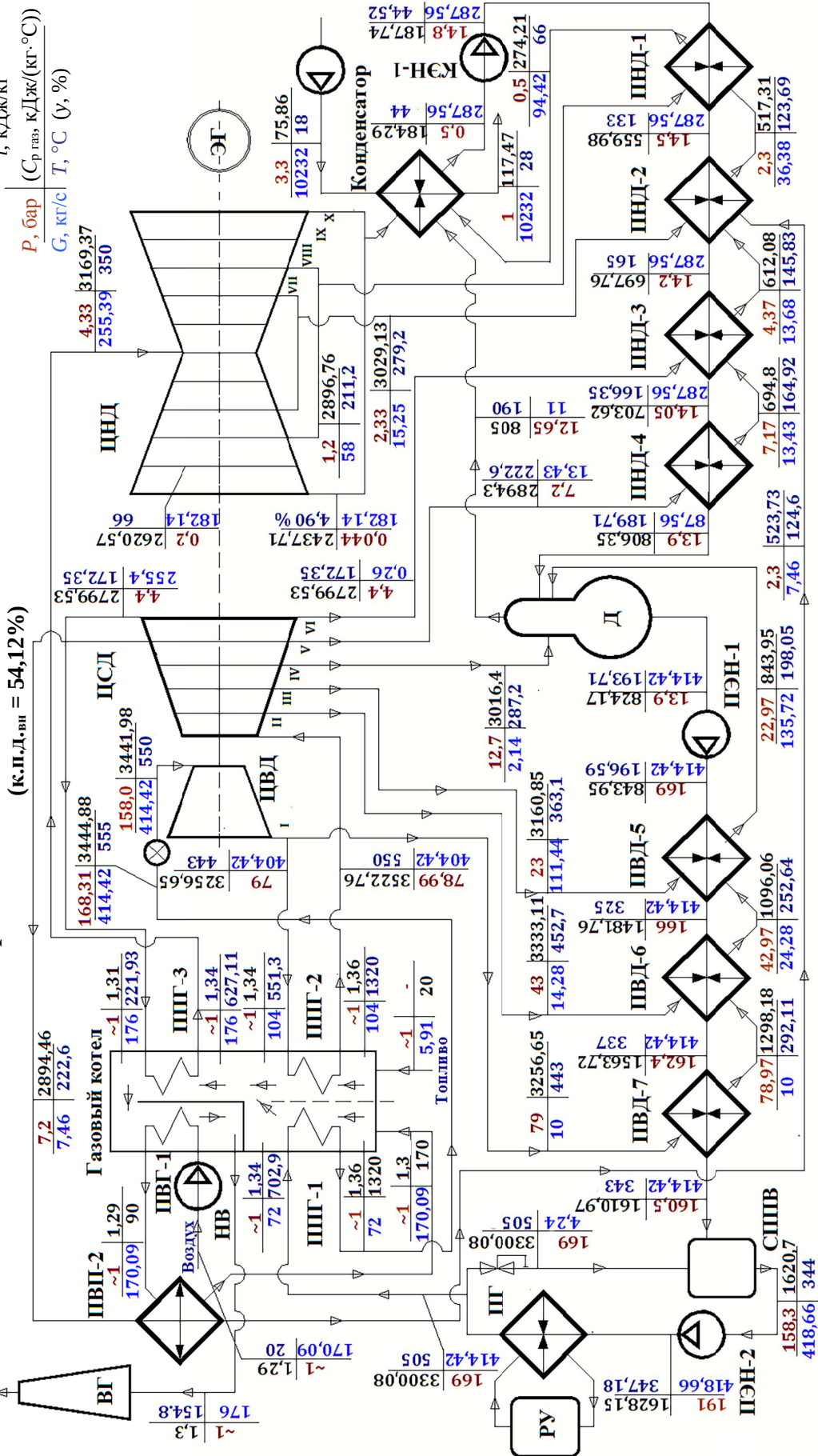
Параметр	ПЭН-2	ПЭН-1	КЭН-1
Давление на входе, МПа	15,8	13,9	0,05
Температура на входе, °С	344	193,7	44
Расход, кг/с	418,7	414,4	287,6
Перепад давления, МПа	3,27	15,51	1,43
Мощность на прокачку теплоносителя, МВт	3,12	8,20	0,99
К.п.д. насоса, %	80	80	80
Мощность насоса электрическая, МВт	3,9	10,2	1,2

Таблица 3. Основные параметры турбин

Параметр	ОЯЭС	АЭС с БРЕСТ-300
Пар перед стопорно-регулирующим клапаном		
Давление, МПа	16,83	15,2
Температура, °С	555	500
Расход, кг/с	414,42	356,11
Рабочее тело перед ЦВД (ЧВД) ПТ		
Давление, МПа	15,8	14,91
Температура, °С	550	498
Расход, кг/с	414,42	356,11
Мощность ЦВД тепловая, МВт	76,8	—
Рабочее тело перед ЦСД (ЧСД) ПТ		
Давление, МПа	7,9	8,53
Температура, °С	550	411
Расход, кг/с	404,42	326,69
Мощность ЦСД тепловая, МВт	262,96	—
Рабочее тело перед ЦНД ПТ		
Давление, МПа	0,43	0,41
Температура, °С	350	256
Расход, кг/с	255,41	196,69
Мощность ЦНД тепловая, МВт	179,88	—
Пар на выходе из ПТ		
Давление, МПа	0,0044	0,004
Температура, °С	30,62	30,1
Расход пара, кг/с	182,15	175,5
Влажность пара, %	4,9	9,73

Тепловая схема привязана к конкретной реакторной установке БРЕСТ-300. При этом принятые в тепловой схеме решения не требуют изменений в ее конструкции и не влияют на работу.

Принципиальная тепловая схема ОЯЭС-520



Принципиальная тепловая схема ОЯЭС с реакторной установкой БРЕСТ-300

В представленном варианте типовая схема имеет газовый котел, в котором установлено теплообменное газовое оборудование: газовые пароперегреватели для повышения параметров рабочего тела перед цилиндрами паровой турбины высокого, среднего и низкого давления, а также предварительный подогреватель воздуха газовый ПВГ-1. Конструктивно тепловой газовый котел представляет собой единый газоход, который условно состоит из трех зон по ходу газа: зона 1 радиационного (топка котла), зона 2 радиационно-конвективного (потолочная горизонтальная часть котла) и зона 3 конвективного теплообмена (опускная по газу часть котла). Горячий газ из топочной камеры (зоны 1) проходит по газоходу последовательно все зоны тракта, отдавая теплоту паровому теплоносителю в теплообменном оборудовании котла: пароперегревателях (ППГ-1, ППГ-2, ППГ-3 цилиндров турбины ЦВД, ЦСД, ЦНД соответственно). Затем он поступает в область газохода для предварительного подогрева воздуха ПВГ-1, где охлаждается до температуры, обеспечивающей минимальный выброс теплоты в окружающую среду. Параметры газовых пароперегревателей приведены в табл. 4.

Воздух после ПВГ-1 поступает в регенеративный паровой подогреватель ПВП-2, где нагревается до 170 °С. ПВП-2 может быть выполнен в виде корпусного теплообменника и расположен вне котла или в виде трубной системы, находящейся в воздуховоде газового котла. Параметры газового ПВГ-1 и парового ПВП-2 подогревателей воздуха приведены в табл. 5.

Конденсатно-питательный тракт турбоустановки выполнен по типовой классической схеме. Он содержит семь подогревателей питательной воды: три подогревателя высокого (ПВД-5, ПВД-6, ПВД-7), четыре низкого давления (ПНД-4, ПНД-3, ПНД-2, ПНД-1), три насоса — конденсатный (КЭН-1), два питательных (ПЭН-1 и ПЭН-2) и деаэратор для обеспечения необходимого водного режима. В схеме перед парогенераторами реакторной установки установлен смешивающий подогреватель питательной воды, который выполняет функции стабилизатора входной температуры теплоносителя парогенераторов, обеспечивая необходимый температурный режим на входе в соответствии с требованиями (недопущение снижения мини-

Таблица 4. Параметры газовых пароперегревателей

Параметр	Теплоноситель	
	греющий газ в газоходе котла	пар высокого давления в трубках
ППГ-1		
Мощность, МВт	60	
СЛТН*, °С	419,4	
Давление на входе, МПа	~0,1	16,9
Температура на входе, °С	1320	505
Давление на выходе, МПа	~0,1	16,83
Температура на выходе, °С	702,92	555
Расход теплоносителя, кг/с	72	414,42
Потери давления, МПа	—	0,17
ППГ-2		
Мощность, МВт	107,9	
СЛТН*, °С	337,3	
Давление на входе, МПа	~0,1	7,9
Температура на входе, °С	1320	443
Давление на выходе, МПа	~0,1	7,89
Температура на выходе, °С	551,3	550
Расход теплоносителя, кг/с	104	404,42
Потери давления, МПа	—	0,001
ППГ-3		
Мощность, МВт	94,5	
СЛТН*, °С	132,2	
Давление на входе, МПа	~0,1	0,44
Температура на входе, °С	627,1	172,35
Давление на выходе, МПа	~0,1	0,43
Температура на выходе, °С	221,9	350
Расход теплоносителя, кг/с	176	255,4
Потери давления, МПа	—	0,017
*Средний логарифмический температурный напор теплообменника.		

мального уровня температуры 340 °С свинцового теплоносителя первого контура). Теплофизические параметры теплоносителей в конденсаторе ОЯЭС приведены в табл. 6, в подогревателях регенеративного тракта ОЯЭС — в табл. 7.

Разработанная типовая схема ОЯЭС с дополнительным источником тепловой энергии показывает возможность получения более высокого к.п.д. по сравнению с обычной АЭС с такой же реакторной установкой. В представленном варианте типовой схемы внутренний к.п.д. цикла составляет 54,12%. Мощность паровой турбины за счет дополнительного перегрева пара уве-

Т а б л и ц а 5. Параметры газового и парового подогревателей воздуха

Параметр	Подогреватель воздуха			
	Газовый ПВГ-1		Паровой ПВП-2	
Мощность, МВт	15,36		17,69	
СЛТН, °С	133,3		43	
Теплоноситель	Газ в газоходе котла	Воздух в воздуховоде котла	Пар высокого давления в трубах	Воздух в межтрубном пространстве
На входе:				
давление, МПа	~0,1	~0,1	0,72	~0,1
температура, °С	221,9	20	222,6	90
На выходе:				
давление, МПа	~0,1	~0,1	0,23	~0,1
температура, °С	154,8	90	124,6	170
Расход, кг/с	176	170,09	7,46	170,09

Т а б л и ц а 6. Теплофизические параметры теплоносителей в конденсаторе ОЯЭС

Параметр	Подвод из устройства			Отвод из конденсатора
	Паровая турбина	Деаэра-тор	ПНД-1	
Давление, МПа	0,0044	0,72	0,12	0,05
Температура, °С	30,62	190	66	44
Расход пара, кг/с	182,14	11	94,41	287,56

Т а б л и ц а 7. Теплофизические параметры теплоносителей в подогревателях регенеративного тракта ОЯЭС

Подвод/отвод теплоносителя из устройства	Расход, кг/с	Давление, МПа	Энтальпия, кДж/кг	Температура, °С
1	2	3	4	5
Из парогенератора	Смешивающий подогреватель питательной воды			
	Греющий теплоноситель (пар)			
	4,24	16,90	3300,08	505
	Питательная вода			
	418,66	15,83	1620,70	344
На выходе	418,66	15,83	1620,70	344
На входе	414,42	16,05	1610,97	343
Из отбора I турбины	ПВД-7, мощность 19,58 МВт			
	Греющий теплоноситель (пар/вода)			
	10	0,79	3256,65	443
	Питательная вода			
	414,42	16,05	1610,97	343
На выходе	414,42	16,05	1610,97	343
На входе	414,42	16,24	1563,72	337

Из отбора II турбины	ПВД-6, мощность 33,97 МВт			
	Греющий теплоноситель (пар/вода)			
	14,28	4,3	3333,11	452,7
	Питательная вода			
	414,42	16,24	1563,72	337
На выходе	414,42	16,24	1563,72	337
На входе	414,42	16,6	1481,76	325
Из отбора III турбины	ПВД-5, мощность 264,32 МВт			
	Греющий теплоноситель (пар/вода)			
	111,44	2,3	3160,85	363,1
	Питательная вода			
	414,42	16,6	1481,76	325
На выходе	414,42	16,6	1481,76	325
На входе	414,42	16,9	843,95	196,6
Из отбора VI турбины	Деаэра-тор			
	Греющий теплоноситель (пар/вода)			
	2,14	1,27	3016,43	287,2
	Питательная вода			
	414,42	1,39	824,17	193,7
На выходе	414,42	1,39	824,17	193,7
На входе	287,56	1,39	806,35	189,7
Из отбора V турбины	ПНД-4, мощность 29,54 МВт			
	Греющий теплоноситель (пар/вода)			
	13,43	0,72	2894,32	222,6
	Питательная вода			
	414,42	16,24	1563,72	337
На выходе	414,42	16,24	1563,72	337
На входе	414,42	16,24	1563,72	337

Окончание табл. 7

1	2	3	4	5
Питательная вода				
На выходе	287,56	1,39	806,35	189,7
На входе	287,56	1,41	703,62	166,4
ПНД-3, мощность 1,69 МВт				
Греющий теплоноситель (пар/вода)				
Из отбора VI турбины	0,26	0,44	2799,53	172,4
Из ПНД-4	13,43	0,71	694,8	164,9
На выходе	13,68	0,43	612,08	145,8
Питательная вода				
На выходе	287,56	1,41	703,62	166,4
На входе	287,56	1,42	697,76	165
ПНД-2, мощность 39,62 МВт				
Греющий теплоноситель (пар/вода)				
Из отбора VII турбины	15,25	0,23	3029,13	279,2
Из ПНД-3	13,68	0,43	612,08	145,8
Из ПВП-2	7,46	0,23	523,73	124,6
На выходе	36,38	0,23	517,31	123,7
Питательная вода				
На выходе	287,56	1,42	697,76	165
На входе	287,56	1,45	559,98	133
ПНД-1, мощность 161,03 МВт				
Греющий теплоноситель (пар/вода)				
Из отбора VIII турбины	58	0,12	2896,76	211,2
Из ПНД-2	36,38	0,23	517,31	123,7
На выходе	94,42	0,05	274,21	66
Питательная вода				
На выходе	287,56	1,45	559,98	133
На входе	287,56	1,48	187,74	44,5

личивается в 1,73 раза. Расчеты показывают, что к.п.д. возрастает с повышением общей мощности турбоустановки.

Основные отличия разработанной типовой схемы ОЯЭС от принятой в проекте АЭС с БРЕСТ-300 заключаются в наличии газового контура с тепловым газовым котлом и парогазовым подогревателем воздуха, замене сепаратора пара и двух последовательных пароперегревателей между цилиндрами среднего и низкого давления турбины на АЭС с БРЕСТ-300 одним парогазовым пароперегревателем ППГ-3, расположенным в газовом котле. Структура конденсатно-питательного тракта почти не отличается от конечного варианта, принятого в проекте АЭС с БРЕСТ-300.

Энергоэффективность ОЯЭС может быть повышена при дальнейшей оптимизации типовой схемы, например, за счет увеличения температуры на входе парогенераторов, оптимизации параметров оборудования в системе подогрева питательной воды, модификации типовой схемы в целом, например, использовании гидроприводов питательных насосов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильченко А.Г., Андрианов С.Г., Бугров М.А. Эффективность применения парогазовых технологий на АЭС с турбинами насыщенного пара. — Вестник ИГЭУ, 2015, вып. 5, с. 11—16.
2. Наумов А.С., Новикова З.Ю., Хрусталева В.А. Повышение эффективности ПГУ на базе ГТУ и АЭС с ВВЭР. — Вестник СГТУ, 2013, № 1, с. 131—137.
3. Касилов В.Ф., Дудолин А.А., Господченков И.В. Эффективность использования парогазовой технологии в энергоблоке АЭС с ядерным реактором СВБР-100. — Теплоэнергетика, 2015, № 5, с. 14—20.

Поступила в Редакцию 9.01.23

УДК 536.63:546.81

ЭНТАЛЬПИЯ И ТЕПЛОЕМКОСТЬ СВИНЦА В КОНДЕНСИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

Станкус С.В., Хайрулин А.Р., Яцук О.С. (ИТ СО РАН, г. Новосибирск)

e-mail: stankus@itp.nsc.ru

Новый интерес к исследованию теплофизических свойств свинца связан с реализацией замкнутого ядерного топливного цикла на базе быстрых реакторов и, в частности, реактора БРЕСТ-300 с жидким свинцом в качестве теплоносителя [1]. Разработка его эффективной и безопасной конструкции требует большого числа

тепловых, гидравлических и прочностных расчетов. Для этого необходимы достоверные данные о комплексе теплофизических свойств жидкометаллического теплоносителя в широком интервале температуры, включая область тяжелых запроектных аварий [2]. Одним из таких свойств является теплоемкость, которая также