

УДК 533.6.011.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОРПУСА ПРИЕМА РАСПЛАВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ЛАВА-Б

Бекмулдин М.К., Гановичев Д.А., Акаев А.С.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье приведены экспериментальные результаты, полученные в ходе проведения исследования теплоизоляционных свойств корпуса устройства приема расплава установки ЛАВА-Б. Определены значения тепловых потерь через стенку корпуса УПР. Выполнен расчет термического сопротивления корпуса УПР.

ВВЕДЕНИЕ

На экспериментальной установке ЛАВА-Б, созданной в ИАЭ НЯЦ РК, проводятся исследования процессов, сопровождающих тяжелую аварию легководного энергетического реактора. Установка позволяет плавить до 60 кг прототипной смеси материалов активной зоны LWR методом индукционной плавки в «горячем тигле» с последующим сливом расплава в экспериментальную секцию.

Экспериментальная установка (рисунок 1) включает в себя два основных функциональных блока: электроплавильную печь (ЭПП) для подготовки расплава прототипного кориума и устройство приема расплава (УПР), в котором размещается экспериментальная секция для моделирования исследуемых процессов [1].



1 - ЭПП (электрическая плавильная печь);
2 - УПР (устройство приема расплава)

Рисунок 1. Установка ЛАВА-Б

В рамках работ было выполнено несколько исследовательских программ:

- Эксперименты по исследованию взаимодействия топлива с теплоносителем (серия FCI);
- Эксперименты по исследованию взаимодействия топлива с остаточной водой внутри корпуса реактора (серия LHI);
- Исследования взаимодействия расплава активной зоны с бетоном (МССИ);
- Экспериментальное изучение нестационарных процессов при удержании кориума в корпусе реактора при имитации остаточного тепловыделения (проект INVECOR);
- Экспериментальное исследование взаимодействия кориума и жаростойких материалов (проект CORMIT);
- Экспериментальные исследования по получению модельного застывшего кориума, аналогичного кориуму, образовавшемуся в результате аварии на АЭС Фукусима-1 (проект Fukushima Debris).

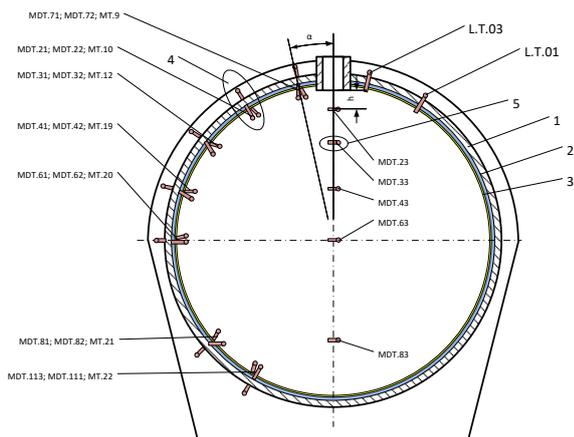
Длительное использование теплоизоляционных материалов приводит к деградации теплоизолирующих свойств. В связи с этим возникла необходимость актуализации теплоизоляционных свойств корпуса устройства приема расплава установки ЛАВА-Б. Таким образом, цель данной работы заключалась в проведении экспериментальных и расчетных исследований, направленных на определение термического сопротивления стенки корпуса УПР.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ЧЕРЕЗ СТЕНКУ КОРПУСА УПР

Перед проведением методического эксперимента по определению тепловых потерь на корпусе УПР было установлено 7 групп (по 3 в каждой группе) хромель-копелевых термопар. Расположение термопар приведено на рисунке 2. Схема установки термопар одной группы на стенке корпуса УПР приведена на рисунке 3.

Принадлежность термопар, установленных на корпусе УПР (наружная и внутренняя поверхность УПР, тепловой экран) приведена в таблице 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОРПУСА ПРИЕМА РАСПЛАВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ЛАВА-Б

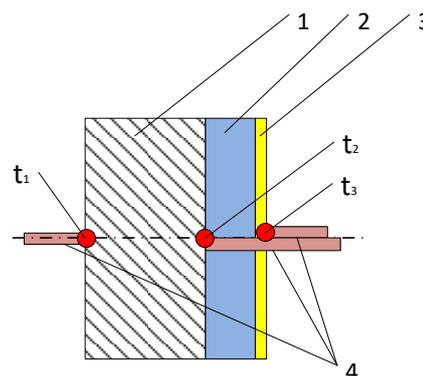


1 - стенка корпуса УПР; 2 - теплоизоляция стенки УПР; 3 - тепловой экран; 4 - термомпары, устанавливаемые на стенке УПР; 5 - термомпары, устанавливаемые по вертикальной оси УПР

Рисунок 2. Схема размещения термомпар в УПР

Таблица 1. Расположение термомпар на корпусе УПР

Номер группы	Наружная поверхность УПР	Внутренняя поверхность УПР	Внутренняя поверхность теплового экрана
1	М.Т.9	МДТ.71	МДТ.72
2	М.Т.10	МДТ.21	МДТ.22
3	М.Т.12	МДТ.31	МДТ.32
4	М.Т.19	МДТ.41	МДТ.42
5	М.Т.20	МДТ.61	МДТ.62
6	М.Т.21	МДТ.81	МДТ.82
7	М.Т.22	МДТ.113	МДТ.111



1 - стенка корпуса УПР; 2 - теплоизоляция стенки УПР; 3 - тепловой экран; 4 - термомпары, устанавливаемые на стенке УПР

Рисунок 3. Схема установки термомпар одной группы на стенке корпуса УПР

Перед началом эксперимента давление в полости УПР было снижено до 0,02 МПа. После вакуумирования в УПР был подан водяной пар (температура 130 °С; степень сухости 0,27; средний расход пара 57,8 г/с). Подача пара в УПР продолжалась в течение 52 минут. Максимальное значение давления в УПР в ходе проведенного эксперимента составило 0,22 МПа [2].

По полученным данным были построены графики изменения температуры стенки УПР и давления среды в УПР. На рисунке 4 приведен график изменения показаний одной из групп термомпар и давления в УПР в ходе проведенного эксперимента.

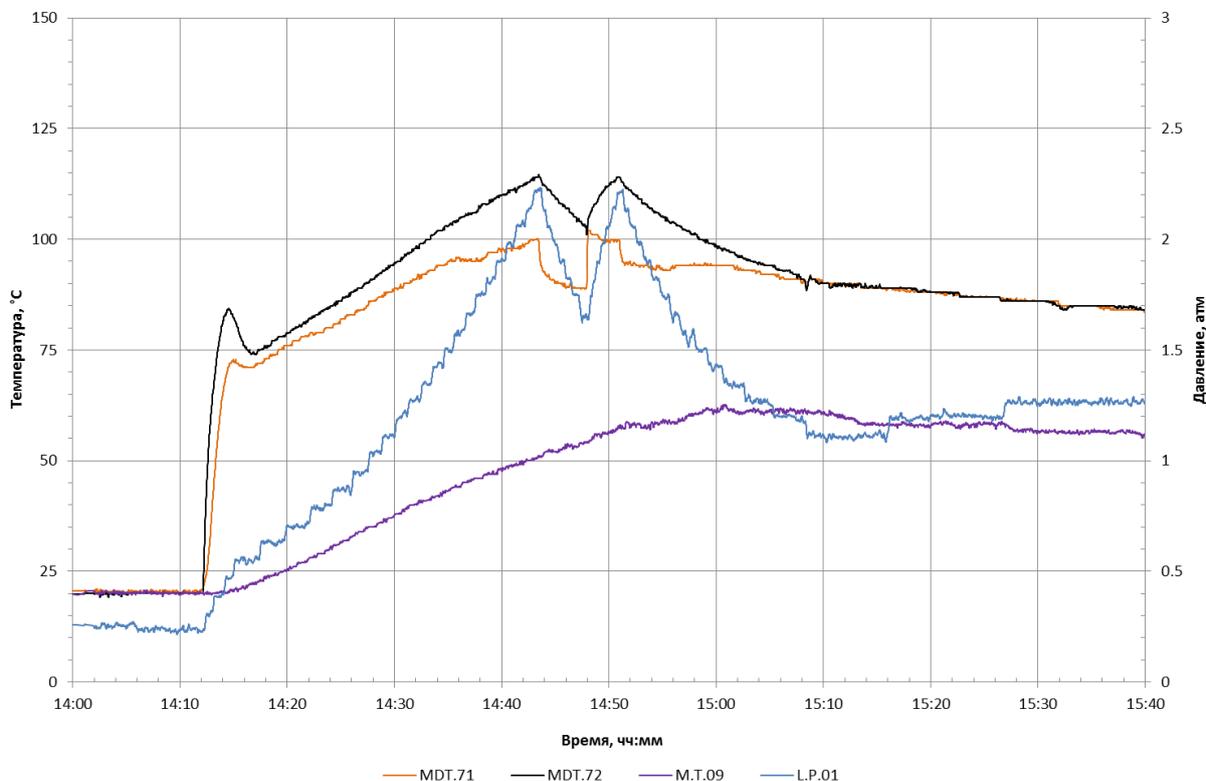


Рисунок 4. Изменение температуры стенки УПР и давления среды в УПР от времени

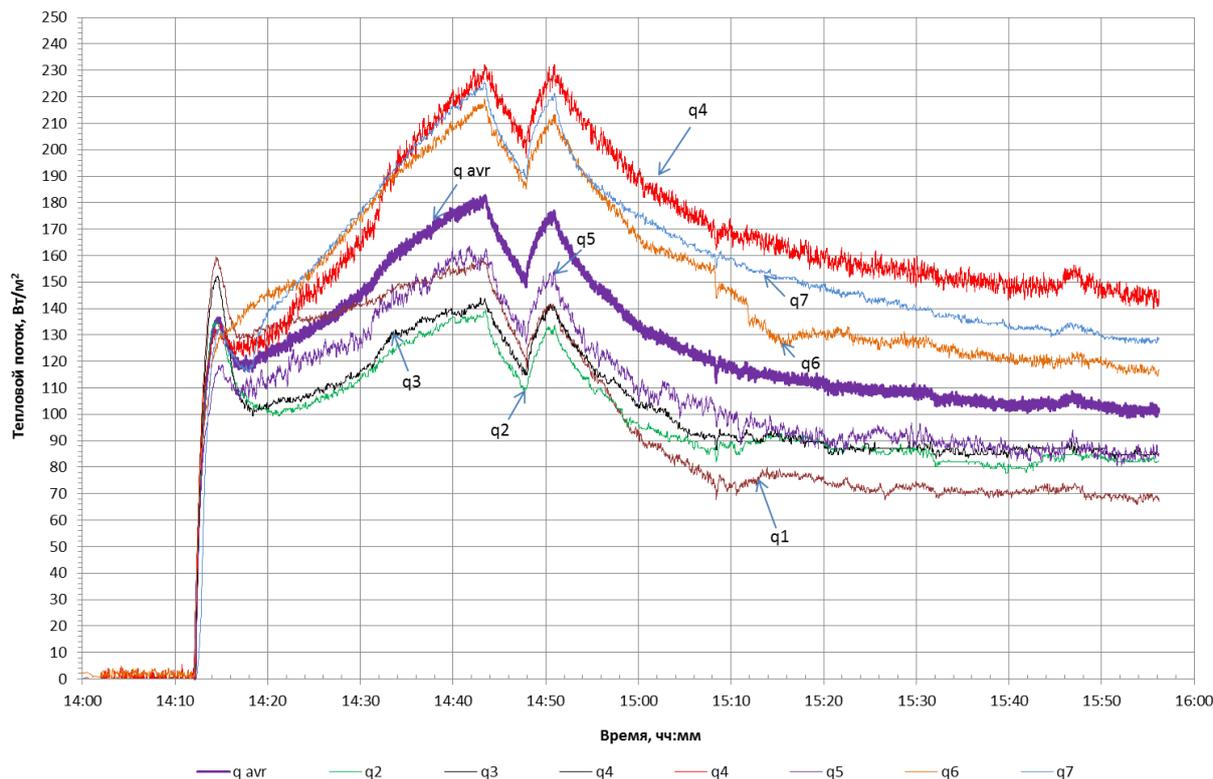


Рисунок 5. Диаграммы изменения теплового потока (q_i) через стенку корпуса УПР

На рисунке 5 приведены рассчитанные значения теплового потока через стенку УПР, определенные по формуле:

$$q = \frac{T_2 - T_1}{\frac{\delta_{\text{корп}}}{\lambda_{\text{корп}}} + \frac{\delta_{\text{теплоиз}}}{\lambda_{\text{теплоиз}}} + \frac{\delta_{\text{теп.экр}}}{\lambda_{\text{теп.экр}}}},$$

где T_2 – температура внутренней поверхности теплового экрана, К; T_1 – температура наружной поверхности корпуса УПР, К; $\delta_{\text{корп}}$ – толщина корпуса, $\delta_{\text{корп}} = 0,03$ м; $\lambda_{\text{корп}}$ – теплопроводность корпуса, $\lambda_{\text{корп}} = 16$ Вт/(м·К); $\delta_{\text{теплоиз}}$ – толщина теплоизоляции, $\delta_{\text{теплоиз}} = 0,02$ м; $\lambda_{\text{теплоиз}}$ – теплопроводность теплоизоляции, $\lambda_{\text{теплоиз}} = 0,05$ Вт/(м·К); $\delta_{\text{теп.экр}}$ – толщина теплового экрана, $\delta_{\text{теп.экр}} = 0,003$ м; $\lambda_{\text{теп.экр}}$ – теплопроводность теплового экрана, $\lambda_{\text{теп.экр}} = 16$ Вт/(м·К).

На графике, показанном на рисунке 5, индексу теплового потока i ($i=1-7$) соответствует номер группы термоэлектрических преобразователей (таблица 1). Максимальное значение усредненного теплового потока (q_{avr}), как видно из приведенного графика, составило 180 Вт/м², что соответствует новой теплоизоляции, теплопроводность которой составляет $0,05$ Вт/(м·К) [3].

С целью определения фактических значений тепловых утечек через стенку УПР был выполнен расчет тепловых потерь по изменению энтальпии пара.

На рисунке 6 точка 1 (время 14:43:30) соответствует моменту прекращения подачи пара. Точка 2 (время 14:48:00) соответствует моменту возобновления подачи пара. Значения давления в заданное вре-

мя: точка 1 – давление 2,24 атм, точка 2 – давление 1,64 атм. Снижение давления среды в УПР после прекращения подачи пара обусловлено теплопередачей запасенного в паре тепла корпусу УПР и утечками тепла от корпуса УПР в окружающую среду. Зная давление пара, определяется его плотность [4] и масса:

$$m_i = \rho_i \times V,$$

где m_i – масса пара в УПР в i -ый момент времени (рисунок 6), кг; V – объем устройства приема расплава, $V = 5,664$ м³.

Зная массу пара и удельное теплосодержание, определяется количество тепла, запасенное паром после прекращения подачи пара (точка 1) и непосредственно перед повторной подачей пара (точка 2):

$$Q_i = i_i \times m_i,$$

где i_i – энтальпия пара в i -ый момент времени, Дж/кг.

В таблице 2 приведены теплофизические параметры пара [4] в указанные моменты времени.

Таблица 2. Теплофизические параметры среды в УПР

Точка	Время	Абсолютное давление, атм.	Плотность пара, кг/м ³	Энтальпия пара (полная энергия), кДж/кг	Масса пара ¹ , кг	Количество тепла пара, кДж
1	14:43:30	2,24	1,256	2711,57	7,09	19226,69
2	14:48:00	1,64	0,937	2697,22	5,28	14267,12

¹⁾ объем внутренней полости УПР составляет 5,664 м³.

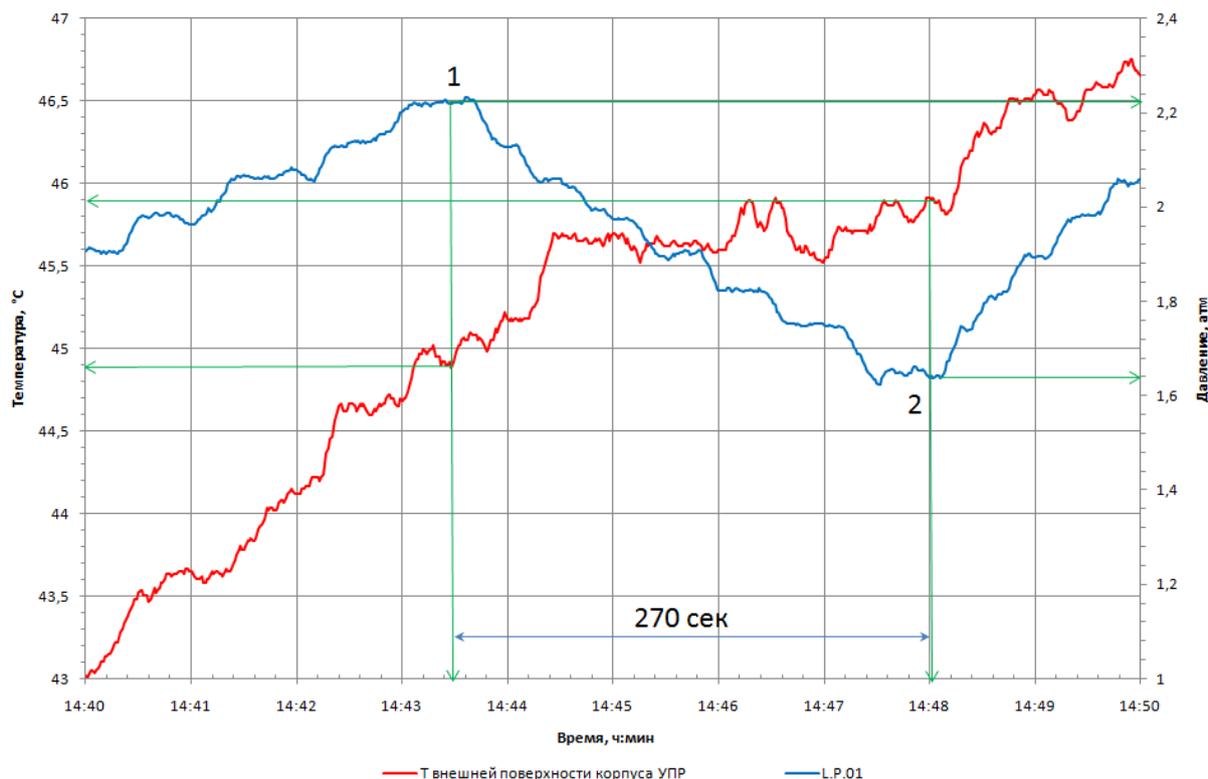


Рисунок 6. Временная зависимость давления пара в УПР и средней температуры внешней поверхности УПР

Таким образом, после прекращения подачи пара количество тепла, запасенное в паре, изменяется на 4959,57 кДж:

$$Q_s = Q_1 - Q_2 = 19226,69 - 14267,12 = 4959,57 \text{ кДж.}$$

Теряемое паром тепло Q_s затрачивается на прогрев корпуса УПР, при этом корпус УПР передает часть тепла в окружающую среду:

$$Q_s = Q + Q_{mr},$$

где Q – утечки тепла в окружающую среду, Дж; Q_{mr} – тепло, затрачиваемое на нагрев корпуса УПР, Дж.

Из рисунка 6 видно, что при снижении давления пара температура стенки УПР увеличивается на 1 °C.

Количество тепла, необходимого для прогрева корпуса УПР на 1 °C, равно $Q_{mr} = 3003$ кДж (масса УПР 6500 кг, теплоемкость материала корпуса УПР равна 462 Дж/(кг×°C)).

Следовательно, количество тепла, передаваемого в окружающую среду, составит

$$Q = Q_s - Q_{mr} = 1956,6 \text{ кДж.}$$

Таким образом, мощность утечки тепла равна

$$N = \frac{Q}{\tau} = \frac{1956575}{270} = 7246 \text{ Вт.}$$

Учитывая, что площадь внешней поверхности корпуса УПР составляет 15 м², плотность теплового потока от внешней поверхности корпуса УПР в окружающую среду равна $q = 483$ Вт/м², что превышает среднее значение тепловых потерь, полученных экспериментальным путем и рассчитанных при теплопроводности теплоизоляции $\lambda = 0,05$ Вт/м×°C, $q_{avr} = 180$ Вт/м² [5].

Термическое сопротивление стенки УПР в точке 1 равно:

$$R_1 = \frac{T_{in1} - T_{out1}}{q} = \frac{115,2 - 44,9}{483} = 0,1455 \text{ (м}^2 \times \text{°C)/Вт,}$$

где T_{in} – температура внутренней поверхности корпуса УПР (рисунок 7), °C; T_{out} – температура внешней поверхности корпуса УПР (рисунок 6), °C.

Термическое сопротивление стенки УПР в точке 2 равно:

$$R_2 = \frac{T_{in2} - T_{out2}}{q} = \frac{102,6 - 45,9}{483} = 0,1174 \text{ (м}^2 \times \text{°C)/Вт.}$$

Среднее значение термического сопротивления стенки УПР составляет 0,1315 (м²×°C)/Вт.

Учитывая расчетное значение термического сопротивления стенки корпуса УПР определено, что теплопроводность теплоизоляции составляет $\lambda = 0,15$ Вт/(м×°C).

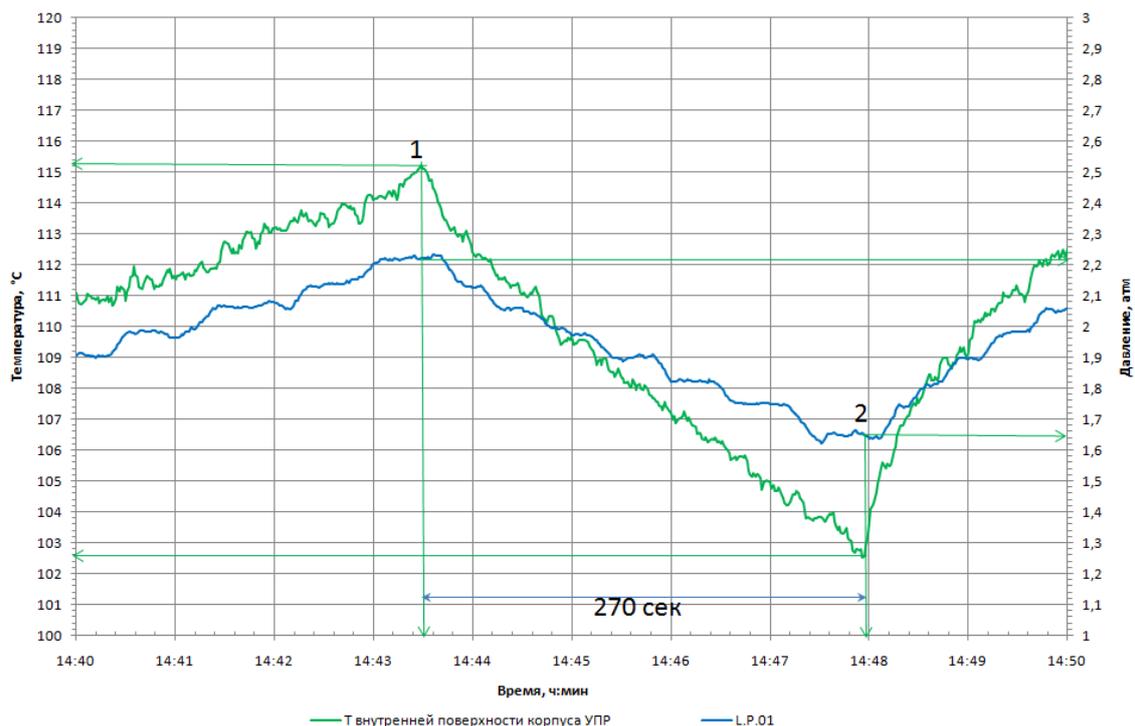


Рисунок 7. Временная зависимость давления пара в УПР и средней температуры оболочки УПР

Выводы

В результате выполненной работы определено:

– плотность теплового потока через стенку корпуса УПР, рассчитанная при теплопроводности теплоизоляции $\lambda = 0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\times^\circ\text{C})$, составила $q_{avr} = 180 \text{ Вт}/\text{м}^2$;

– плотность теплового потока через стенку корпуса УПР, рассчитанная по изменению энтальпии пара, составила $q = 483 \text{ Вт}/\text{м}^2$;

– среднее значение термического сопротивления стенки корпуса УПР составляет $0,1315 (\text{м}^2\times^\circ\text{C})/\text{Вт}$;

– расчетное значение теплопроводности теплоизоляции корпуса УПР составило $\lambda = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\times^\circ\text{C})$.

Полученные результаты могут быть использованы для определения тепловых потерь через корпус устройства приема расплава при проведении экспериментальных работ на установке ЛАВА-Б.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скаков М.К., Васильев Ю.С., Деряжко И.И. и др., Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан – 60 лет. – под общ. ред. Э.Г. Батырбекова и М.К. Скакова. – Кокшетау: КФ «Кокшетау», 2018, стр. 139–141.
2. Протокол эксперимента VT-02 на установке ЛАВА-Б, № 13-240-02/15 вн., 04.01.2019.
3. И. А. Гусарова, Высокотемпературный теплоизоляционный материал на основе керамических волокон. – Космическая наука и технология, Т. 23, № 2, 2017, стр. 27.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М., Энергия, 1977, 336 с. 5. Б.В. Щетанов, Ю.А. Ивахненко, В.Г. Бабашов, Теплозащитные материалы. – Всероссийский институт авиационных материалов, август 2009.

ЛАВА-Б ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ БАЛҚЫМАСЫН ҚАБЫЛДАУ КОРПУСЫНЫҢ ЖЫЛУ ӨТКІЗБЕЙТІН ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

М.К. Бекмулдин, Д.А. Гановичев, А.С. Акаев

Қазақстан, Қурчатов, ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы

Мақалада ЛАВА-Б қондырғысының балқыманы қабылдау құрылғысы корпусының жылуды оқшаулау қасиеттеріне зерттеу жүргізу барысында алынған эксперименттік нәтижелер келтірілді. БСҚ корпусының қабырғасы арқылы жылу шығындарының мағыналары анықталды. БСҚ корпусының термиялық кедергісінің есебі орындалды.

**INVESTIGATION OF THERMAL-INSULATING PROPERTIES OF A MELT RECEIVER'S CASING
OF THE LAVA-B EXPERIMENTAL FACILITY**

M.K. Bekmuldin, D.A. Ganovichev, A.S. Akayev

Institute of Atomic Energy Branch RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper provides experimental results obtained during studying of heat resistant properties of casing of melt receiver of the LAVA-B facility. Values of heat losses through the wall of MR casing were determined. A heat resistance of MR casing has been calculated.