

РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ С ХОЛОДНЫМ ТИГЛЕМ ДЛЯ ОСТЕКЛЫВАНИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ

Волуца Арина Витальевна

студент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, РФ, г. Санкт-Петербург

Аннотация. В ходе работы было проведено два электрических расчета индукционной установки для остекливания ЖРО (жидкие радиоактивные отходы) с учетом реальных тепловых потерь и теоретических, при тепловых потерях в 10% от полезной мощности печи. Под индукционной установкой понимают весь комплекс устройств, обеспечивающих осуществление электротермического процесса. В качестве ЖРО рассмотрены высокоактивные трансурановые радионуклиды. На 250 кг расплава приходится 50 кг отходов с активностью 105 кБк/кг. В ходе расчета были приняты характеристики, которые соответствуют ГОСТУ EN 1748-1-1-2016, см.Таблицу1.

Ключевые слова: тепловые потери; индукционная печь с холодным тиглем; электрический расчет; коэффициент полезного действия; мощность; производительность.

Введение

Жидкие радиоактивные отходы – это ядерные отходы, которые образуются в результате эксплуатации атомных электростанций. Для захоронения ЖРО используется технология остекливания, в которой применяется индукционная печь с холодным тиглем.[1]

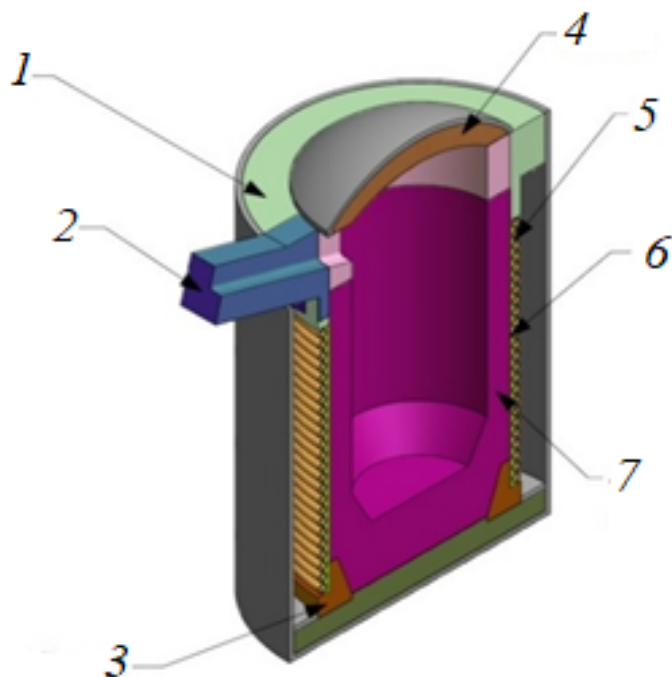


Рисунок 1. - Индукционная печь с холодным тиглем:

1 - верхняя крышка; 2 - носик; 3 - подина; 4 - корпус; 5 - индуктор; 6 - тигель; 7 - футеровка тигля

При осуществлении процесса нагрева и плавления боросиликатного стекла в индукционной печи присутствует большое количество тепловых потерь. Эти потери необходимо учитывать при расчете мощности для исправной работы индукционной установки.[2]

Цель работы - провести тепловой расчет печи с холодным тиглем; рассчитать характеристики установки, с учетом тепловых потерь; проанализировать зависимость КПД тигельной печи от тепловых потерь.

Материалы

Таблица 1.

Принятые характеристики

Температура плавления, °С	Температура разливки, °С	Теплосодержание (энтальпия) в расплавленном состоянии, Дж/кг (кВт-ч/кг)	Удельное сопротивление в холодном состоянии, Ом×м	соп. рас. сост
820	1245	$505,2 \times 10^3 / 0,14$	55×10^{-3}	

- вид расплава – боросиликатное стекло;

- относительная магнитная проницаемость шихты 0,999987;
- температуру загружаемой шихты 18 °С;
- ёмкость тигля 250 кг;
- длительность процесса плавки 3,5ч

Состав стекла: Диоксид кремния SiO_2 (70-87%); Оксид бора B_2O_3 (7-15%); Оксид натрия Na_2O (0-8%); Оксид калия K_2O (0-8%); Оксид алюминия Al_2O_3 (0-8%) [3]

Расчет

Задачей теплового расчета является определение температуры наружной поверхности футеровки, расчет тепловых потерь и теплового коэффициента полезного действия печи. Расчет тепловых потерь ведут отдельно для следующих элементов: боковой поверхности тигля, подины, крышки. Пусть боковая поверхность тигля состоит из трех слоев: огнеупорный бетон, шамот легковесный ШЛ-1, асбест. [4]

Зададим значения температур на границах слоев, °С:

$$T_1 = 820, T_2 = 100, T_3 = 20.$$

Исходя из этих значений, определяем средние значения температур, °С:

$$T_{1\text{ср}} = \frac{T_1 + T_2}{2} = 460$$

$$T_{2\text{ср}} = \frac{T_2 + T_3}{2} = 60$$

Находим теплопроводности слоев футеровки, Вт/м·°С: [5]

$$\lambda_{\text{бет}} = 0,9 + 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_{1\text{ср}} = 1,22$$

$$\lambda_{\text{асб}} = 0,107 + 0,19 \cdot 10^{-3} \cdot T_{2\text{ср}} = 0,118$$

Определяем тепловые потери через боковую поверхность, Вт:

$$P_{\text{т.б.}} = \frac{T - T_{\text{окр}}}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{\text{бет}}} \cdot \ln \frac{D_1}{D} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{\text{асб}}} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1}} =$$

$$= \frac{820 - 20}{\frac{1}{2 \cdot 1,22} \cdot \ln \frac{0,53}{0,48} + \frac{1}{2 \cdot 0,18} \cdot \ln \frac{0,68}{0,53}} = 730$$

где:

$T = 820$ – температура внутренней поверхности стенки, °С;

$T_{\text{окр}} = 20$ – температура внешней поверхности стенки, °С;

$D_1 = 0,53$ – наружный диаметр слоя огнеупорного бетона, м;

$D^2 = 0,68$ - наружный диаметр слоя асбеста, м;

$D = 0,48$ - средний диаметр садки, м;

$H = 0,96$ - высота стенки, м;

Тепловые потери излучением зеркала ванны, Вт:

$$P_{\text{изл}} = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \xi =$$
$$= 0,9 \cdot 5,67 \cdot \left[\left(\frac{820}{100} \right)^4 - \left(\frac{20}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{\pi \cdot 0,48^2}{4} \cdot 0,5 = 788,6$$

где:

$\varepsilon = 0,85$ - степень черноты расплава;

$c_0 = 5,67$ - коэффициент абсолютно черного тела;

$\xi = 0,2$ - коэффициент диафрагмирования. [6]

Определяем тепловые потери подины печи.

Поверхности слоёв, м²:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,48^2}{4} = 0,18$$

$$F_2 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,53^2}{4} = 0,22$$

$$F_3 = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,68^2}{4} = 0,36$$

Определяем средние значения поверхностей слоёв, м²:

$$F_{1\text{ср}} = \frac{F_1 + F_2}{2} = 0,2$$

$$F_{2\text{ср}} = \frac{F_2 + F_3}{2} = 0,29$$

Определяем тепловые потери через крышку и подину печи, Вт:

$$P_{\text{т.к.п.}} = 2 \cdot \frac{T - T_{\text{окр}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}} \cdot F_1} + \frac{b_1}{\lambda_{\text{бет}} \cdot F_{1\text{ср}}} + \frac{b_2}{\lambda_{\text{асб}} \cdot F_{2\text{ср}}}} = 561,46,$$

где:

$T=820$ — температура внутренней поверхности стенки, °C;

$T_{\text{окр}}=20$ — температура внешней поверхности стенки, °C;

$\alpha_{\text{вн}} = 10$ — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · °С); ($\alpha_{\text{вн}} = 10$, так как конвекция воздуха свободная)[6]

$b_1 = 0,025$ — толщина слоя огнеупорного бетона, м;

$b_2 = 0,075$ — толщина слоя асбеста, м.

Суммарные тепловые потери печи, Вт:

$$P_{\text{п.т.}} = P_{\text{т.к.п.}} + P_{\text{т.б.}} + P_{\text{изл}} = 2080,06$$

Уточним активную мощность, подводимую к нагрузке P_2 , кВт:

$$P_2 = P_{\text{пол}} + P_{\text{п.т.}} = 12,08$$

В таблице 2 приведены характеристики рассчитанной индукционной установки, при тепловых потерях в 10% от полезной мощности печи $\Delta P_m = 1$ кВт.

Таблица 2.

Характеристики установки (при тепловых потерях в 10% от полезной мощности печи $\Delta P_m = 1$ кВт).

Характеристики		Единица измерения
Длительность плавки		ч
Содержание концентрата в стекломатрице		масс. %
Температура расплава		°С
Ёмкость ИТП		т
Мощность ИТП		кВт
Мощность установки		кВт
Напряжение		В
Частота		МГц
Производительность ИТП		т/ч
КПД установки		%
Удельный расход электроэнергии		кВт·ч/т

В таблице 3 приведены характеристики установки, с учетом реальных тепловых потерь $\Delta P_m = 2,08$ кВт.

Таблица 3.

Характеристики установки, с учетом реальных тепловых потерь $\Delta P_m = 2,08$ кВт.

Характеристики		Единица измерения
Длительность плавки		ч
Содержание концентрата в стекломатрице		масс. %
Температура расплава		°С
Ёмкость ИТП		т
Мощность ИТП		кВт
Мощность установки		кВт
Напряжение		В
Частота		МГц

Производительность ИТП		т/ч
КПД установки		
Удельный расход электроэнергии		кВт-

Содержание концентрата в стекломатрице в перерасчете на сухой остаток составило до 30 масс.%. А скорость выщелачивания радионуклидов $\sim 10^{-5}$ г/см²сут, что соответствует требованиям к химической устойчивости остеклованных высокоактивных отходов.[4]

Расчетные соотношения характеристик, приведенных в таблице 2:

Ориентировочно $\Delta P_{\text{ток}}$ можно принять равным 5% от мощности источника $P_{\text{ист}}$.

$$\Delta P_{\text{ток}} = P_{\text{ист}} * 0,05, \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{\text{ток}} = 13420 * 0,05 = 671 \text{ Вт}$$

Мощность, потребляемая от источника питания

$$P_{\text{ист}} = \Delta P_{\text{э.и.}} + \Delta P_{\text{э.б.}} + \Delta P_{\text{ток}} + P_2, \text{ Вт.}$$

$$P_{\text{ист}} = 175,2 + 200 + 671 + 11000 = 12047 \text{ Вт}$$

где:

$\Delta P_{\text{э.и.}}$ – электрические потери в индукторе;

$\Delta P_{\text{э.б.}}$ – электрические потери в источнике питания;

$\Delta P_{\text{ток}}$ – потери в токопроводе определяются;

P_2 – Активная мощность, передаваемая в загрузку ИТП.

Электрические потери в источнике питания: [7]

$$\Delta P_{\text{и.п.}} = P_{\text{ист}} * \left(\frac{1}{\eta_{\text{пр}}} - 1 \right)$$

$$\Delta P_{\text{и.п.}} = 12047 * \left(\frac{1}{0,91} - 1 \right) = 1192$$

где $\eta_{\text{пр}}$ – КПД преобразователя, $\eta_{\text{пр}} = 0,91$.

Активная мощность, потребляемая от сети

$$P_{\text{с}} = P_{\text{ист}} + \Delta P_{\text{с}}$$

$$P_{\text{с}} = 12047 + 12047 * 0,1 = 13252 \text{ Вт}$$

Общий КПД плавильной установки

$$\eta = \frac{P_{\text{ист}}}{P_{\text{с}}}$$

$$\eta = \frac{12047}{13252} = 0,91$$

где:

$P_{\text{ист}}$ – мощность, потребляемая от источника питания;

P_c – активная мощность, потребляемая от сети.

Удельный расход электроэнергии [8]

$$W' = 2,78 * 10^{-4} * \frac{q}{\eta}, \quad \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}}$$

$$W' = 2,78 * 10^{-4} * \frac{505,2}{0,91} = 0,154 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}}$$

где q – теплосодержание, Дж/кг.;

Выводы

Тепловые потери через боковую поверхность тигля ($P_{\text{т.б.}} = 730 \text{ Вт}$), подину и крышку ($P_{\text{т.к.п.}} = 561,46 \text{ Вт}$). Суммарные тепловые потери печи ($P_{\text{п.т.}} = 2080,06 \text{ Вт}$).

С учетом реальных тепловых потерь характеристики установки: КПД ($\eta = 0,82$); мощность установки ($P_c = 16,3 \text{ кВт}$); производительность ($m = 0,083 \text{ т/ч}$). При возрастании тепловых потерь с 1 кВт до 2,08 кВт, КПД установки упало с 0,91 до 0,82, а мощность установки выросла с 13,3 до 16,3 кВт. Это говорит о линейной зависимости КПД от тепловых потерь. При этом, производительность установки осталась прежней.

Список литературы:

1. Сайт "НИТИ РОСАТОМ": Остекловывание радиоактивных отходов. URL: https://niti.ru/?page_id=1720 [12.10.2022]
2. Иванова Л.И. Индукционные тигельные печи: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. /Л.И. Иванова, Л.С. Грובה, Б.А. Сокунов, С.Ф. Сарапулов. Екатеринбург: Изд- во УГТУ - УПИ, 2002. - 87с.
3. Сайт «База технических требований»: Технические требования для боро-силикатного стекла. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293745/4293745984.htm> [12.10.2022]
4. Научный портал "Атомная энергия 2.0": Уникальный метод остекловыва-ния. URL: <https://www.atomic-energy.ru/technology/17320> [12.10.2022]
5. Сорокин В.Т., Павлов Д.И., Кашеев В.А., Мусатов Н.Д., Баринев А.С. Научные и проектные аспекты остекловывания жидких радиоактивных отходов АЭС с ВВЭР-1200. Радиоактивные отходы. 2020. № 2 (11). С. 56-65.
6. Сайт «himikatus.ru»: Химический портал. URL: <https://himikatus.ru/art/htlab/612teploizol.php> [12.10.2022]

7. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. М.:Металлургия, 1979. 247с.

8. Слухоцкий А.Е. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов/ А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунер; Под ред. А.Е. Слухоцкого. Л., Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1981. 328с.