

**К ПРОБЛЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ КОМПОНЕНТОВ,
ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВСКРЫТИИ ТВЭЛОВ, НА
ВИБРОТРАНСПОРТИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ****Б.Г. САПОЖНИКОВ, А.М. ГОРБУНОВА, Ю.О. ЗЕЛЕНКОВА,
Н.П. ШИРЯЕВА****Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург**

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена жидких и твердых компонентов, полученные на модельных материалах, на вибротранспортирующей наклонной поверхности. Установлено, что при параметрах вибрации, обеспечивающих перемещение затвердевших частиц, искомый коэффициент теплоотдачи зависит, прежде всего, от частоты падения капель, монотонно возрастающая с ее увеличением, и в меньшей степени – от параметров вибрации. Полученные данные свидетельствуют о перспективности рассмотренного подхода к проблеме охлаждения жидких и твердых компонентов в качестве одного из вариантов при термическом вскрытии твэлов.

Ключевые слова: термическое вскрытие, твэл, жидкие и твердые компоненты, кристаллизация, вибротранспортирующая поверхность, регулярный тепловой режим, теплоотдача.

Введение

Накопление отработавшего топлива АЭС требует создания прогрессивных технологических схем его регенерации, включающих в себя на первом этапе операцию вскрытия тепловыделяющих сборок (например, в реакторах типа БН). Альтернативой механической разделки твэлов с последующим выщелачиванием или удалением их оболочки химическим путем является термическое вскрытие, которое относится к высокотемпературным процессам ($t = 1500 \div 1550^\circ\text{C}$) [1–5]. При этом происходит плавление конструкционных материалов, в результате чего топливный сердечник освобождается от оболочки. Под собственным весом капли расплава и таблетки сердечника поступают в узел охлаждения продуктов вскрытия, где происходит затвердевание расплава, превращение его в гранулы и охлаждение таблеток и гранул до необходимой температуры ($t \approx 500^\circ\text{C}$).

При охлаждении жидких компонентов в общем случае тепловой поток складывается от перегрева жидкого металла, его кристаллизации и теплоты охлаждения твердой фазы. В металлургии [6–10] для количественной оценки этого процесса используется средняя скорость охлаждения $\bar{W}$, определяющая структуру твердой фазы и ее свойства. Например, по данным авторов [9] для стали она составляет $2,3 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^5$ К/с. По скорости охлаждения в некоторых работах проводилась и оценка коэффициентов теплоотдачи. В частности [8], при контакте жидкого алюминия с медной подложкой расчетным путем было получено для среднего коэффициента теплоотдачи α значение порядка $2 \cdot 10^5$ Вт/(м²·К). В приведенных работах [6–9] при определении коэффициентов теплоотдачи не учитывается вся совокупность тепловых потоков, сопровождающих в общем случае охлаждение расплава до твердой фазы, что

© Б.Г. Сапожников, А.М. Горбунова, Ю.О. Зеленкова, Н.П. Ширяева
Проблемы энергетики, 2016, № 3-4

является одной из причин расхождения полученных результатов. В этом отношении определенный интерес представляет работа [10], в которой приводятся данные по коэффициентам теплоотдачи от расплавленного металла в виде открытой струи к твердой фазе, достигающим величины $\alpha \approx 880 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. В более поздних работах коэффициент теплоотдачи используется лишь для оценки интенсивности теплообмена к охлаждающей среде в установках непрерывного литья заготовок [11, 12]. Ограниченность литературных данных свидетельствует о необходимости дополнительных исследований теплообмена при кристаллизации расплава в виде потока падающих капель и таблеток сердечника при охлаждении на металлической поверхности.

Методика исследования и описание экспериментальной установки

В качестве транспортирующей была выбрана наклонная вибрирующая поверхность. Наличие наклона обеспечивало надежное нисходящее перемещение компонентов даже при вертикально направленной вибрации, как более простой в реализации.

Для исследования теплоотдачи между компонентами и поверхностью был принят метод регулярного теплового режима [13, 14]. Он позволяет определять коэффициент теплоотдачи с учетом всех тепловых потоков: от перегрева расплава относительно температуры плавления, его кристаллизации и переохлаждения твердой фазы. В качестве датчика (α -калориметра) использовался медный диск $\varnothing 40 \times 5 \text{ мм}$, размещенный заподлицо с транспортирующей поверхностью (рис. 1, а), поз.4. Если обозначить искомый коэффициент теплоотдачи на активном участке поверхности диска F_0 через α_0 , а на остальном участке поверхности диска F через α , то для тел с числом $Bi < 0,1$ на основании уравнения теплового баланса можно записать:

$$\begin{aligned} c_P \rho V dt &= \alpha_0 (t_{\text{ж}} - t) F_0 d\tau - \alpha (t - t_0) F d\tau = (t_{\text{ж}} - t) d\tau (\alpha_0 F_0 - \alpha F \frac{t - t_0}{t_{\text{ж}} - t}) = \\ &= \alpha_{\text{пр}} (t_{\text{ж}} - t) F_{\text{общ}} d\tau, \end{aligned} \quad (1)$$

где $F_{\text{общ}} = F_0 + F$ – полная поверхность диска; $t_{\text{ж}}$ – температура жидкого металла; t , t_0 – текущая и начальная температура медного диска (α -калориметра); τ – время; приведенный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{\text{пр}} = \alpha_0 \frac{F_0}{F_{\text{общ}}} - \alpha \frac{F}{F_{\text{общ}}} \cdot \frac{t - t_0}{t_{\text{ж}} - t}. \quad (2)$$

$$\text{Тогда из уравнения (1) следует } -\frac{d(t_{\text{ж}} - t)}{(t_{\text{ж}} - t) d\tau} = -\frac{d\vartheta}{\vartheta d\tau} = m = \frac{\alpha_{\text{пр}} F_{\text{общ}}}{c_P \rho V}, \quad (3)$$

где $\vartheta = t_{\text{ж}} - t$ – избыточная температура; m – темп охлаждения.

Используя уравнение (3) с учетом (2), можно получить, что

$$\alpha_0 = m \frac{c_P \rho V}{F_0} + \alpha \frac{F}{F_0} \cdot \frac{t - t_0}{t_{\text{ж}} - t}, \quad (4)$$

где c_P , ρ , V – удельная теплоемкость, плотность и объем медного диска (α -калориметра) соответственно.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

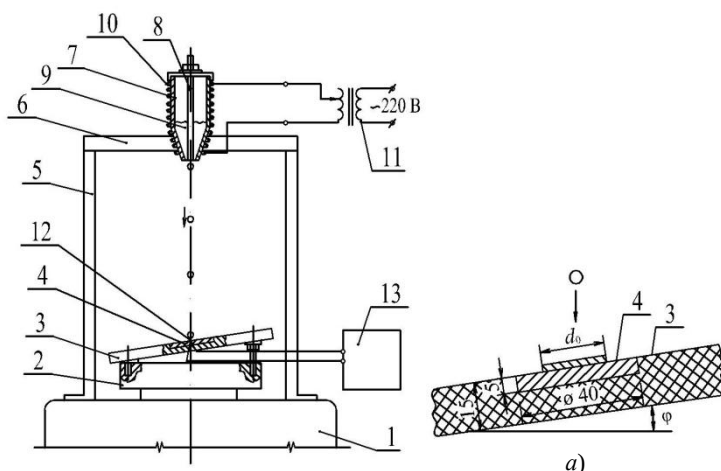


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – вибростенд; 2 – вибростол; 3 – транспортирующая поверхность; 4 – медный диск (α -калориметр); 5 – стойки; 6 – плита; 7 – керамический сосуд; 8 – профильный стержень; 9 – жидкий металл; 10 – электронагреватель; 11 – автотрансформатор; 12 – термопара; 13 – электронный самопишущий потенциометр; а) – медный диск 4 (α -калориметр) с участком транспортирующей поверхности 3 крупным планом

Основным элементом установки является транспортирующая поверхность 3, (выполненная из низко теплопроводного материала, размерами 250×60 мм), в средней части которой заподлицо с поверхностью размещался α -калориметр 4. Транспортирующая поверхность вместе с α -калориметром жестко крепилась под некоторым углом φ (в опытах $8-9^\circ$) к вибростолу 2 вибростенда 1. Вибростол совершал вертикально направленные колебания с частотой $f = 40$ и 50 Гц и амплитудой A от $0,3$ до $1,4$ мм. В качестве модельного для жидкого компонента был выбран расплав олова с температурой плавления $t_{\text{пл}} = 232^\circ\text{C}$.

Расплав создавался в керамическом сосуде 7 с электрическим обогревателем 10. Температура расплава регулировалась автотрансформатором 11, а контролировалась с помощью хромель-алюмелевой термопары (на схеме, рис. 1, не показана).

Частота падения капель жидкого металла регулировалась путем перемещения профильного стержня 8, перекрывающего с определенным зазором нижнее отверстие в керамическом сосуде. В процессе эксперимента температура t α -калориметра измерялась одной хромель-копелевой термопарой 12, что возможно при условии $Bi < 0,1$, и фиксировалась электронным самопишущим потенциометром 13.

Методика проведения опытов с расплавом состояла в следующем. С помощью вибростенда задавались определенные значения частоты и амплитуды вибрации транспортирующей поверхности. В керамическом сосуде готовился расплав определенной температуры $t_{\text{ж}} > t_{\text{пл}}$, который в виде капель подавался на поверхность α -калориметра с начальной температурой t_0 . Измерялись следующие величины: частота вибрации f , амплитуда A , расстояние h от выходного отверстия керамического сосуда до поверхности α -калориметра, температура жидкого металла $t_{\text{ж}}$, начальная температура поверхности α -калориметра t_0 , изменение температуры поверхности t во времени, частота падения капель расплава ν_0 на поверхность α -калориметра.

Результаты экспериментов и их анализ

С помощью визуальных наблюдений было установлено, что падающие капли после соударения с поверхностью α -калориметра растекались до определенного

размера в плане, после чего кристаллизовались в виде тонких плоских пластинок. Анализ показал, что кристаллизация происходила вглубь и с краев размазанной капли. В последнюю очередь затвердевала средняя (центральная) часть образовавшейся пластинки. Форма пластинок в большинстве случаев была круглой, а иногда (до 30 %) имела вид сегмента с углом $240 \div 300^\circ$. Принималось, что в теплообмене участвует часть поверхности F_0 , ограниченная размерами пластинки d_0 . Остальная часть медного диска F контактировала с окружающим воздухом или через тонкий воздушный зазор с низко теплопроводной транспортирующей поверхностью 3. Специальные опыты показали, что теплообмен этих участков поверхности F , характеризуемый эффективным коэффициентом теплоотдачи α , не превышает $12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Входящий в уравнение (4) темп охлаждения находился в результате обработки экспериментальной зависимости избыточной температуры $\vartheta = t_{\text{ж}} - t = f(\tau)$, представленной в полулогарифмических координатах, по формуле

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (5)$$

В качестве примера на рис. 2, а показаны экспериментальная кривая 1 изменения температуры α -калориметра t и пересчитанная по ней избыточная температура $\vartheta = t_{\text{ж}} - t = f(\tau)$ (кривая 2), а на рис. 2, б – обработка последней в полулогарифмических координатах. На рис. 2, б видно, что опытные точки с малым разбросом располагаются вдоль прямой 1, что свидетельствует о наступлении регулярного теплового режима и, кроме того, подтверждает правомерность принятой методики исследования. По данным на рис. 2, б с использованием уравнения (5) рассчитывался темп охлаждения.

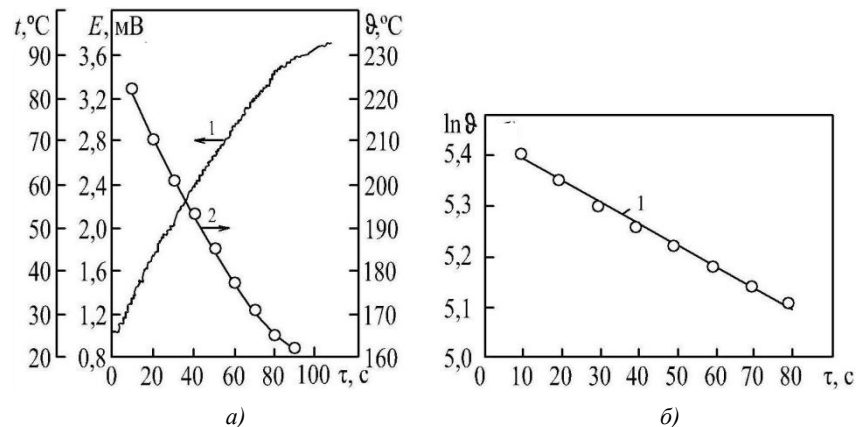


Рис. 2. Фрагмент диаграммы (а, кривая 1) с записью изменения температуры t α -калориметра $\varnothing 40 \times 5$ мм, выполненного из меди: $f=40$ Гц, $A=0,6$ мм, $h=360$ мм, $v_0=1,0$ кап/с (таблица, поз. 13), и пересчитанная по ней избыточная температура ϑ (кривая 2); б – обработка в полулогарифмических координатах

Аналогичной обработке подвергались остальные экспериментальные данные. При расчете коэффициента теплоотдачи α_0 по формуле (4) и темпа охлаждения m по (5) принималось: $t_{\text{ж}} = 255^\circ\text{C}$, $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $F_0 = 0,38 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, что соответствовало эквивалентному диаметру пластинок $d_0 = 22$ мм; $F = F_{\text{общ}} - F_0 = 3,14 \cdot 10^{-3} - 0,38 \cdot 10^{-3} = 2,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $c_p = 381 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\rho = 8800 \text{ кг}/\text{м}^3$, $V = 6,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Условия проведения опытов и расчетные данные: темпа охлаждения m и

коэффициентов α_0 , приведены в таблице; среднеквадратичные погрешности их определения не превышали 3 и 7% соответственно.

Таблица

Результаты экспериментального исследования теплоотдачи
при кристаллизации расплава на вибрирующей медной поверхности

а) чистая поверхность						
№ п/п	ν_0 , кап/с	f , Гц	A , мм	$K = \frac{A(2\pi f)^2}{g}$	$m \cdot 10^3$, 1/с	α_0 , Вт/(м ² ·К)
1	0,6	40	0,6	3,86	3,0	186
2	0,6	40	1,4	9,01	6,4	375
Ср.1,2	0,6	40	-	-	-	281
3	0,9	40	1,4	9,01	7,3	426
4	1,1	40	1,0	6,44	8,4	485
5	1,7	40	0,6	3,86	8,9	513
6	>2	40	1,4	9,01	21,0	1183
б) окисленная поверхность						
№ п/п	ν_0 , кап/с	f , Гц	A , мм	$K = \frac{A(2\pi f)^2}{g}$	$m \cdot 10^3$, 1/с	α_0 , Вт/(м ² ·К)
7	0,3	50	1,0	10,06	2,0	131
8	0,5	50	1,0	10,06	2,5	159
9	0,6	40	0,6	3,86	5,2	308
10	0,7	50	0,6	6,04	4,9	291
11	0,8	35	1,0	4,83	4,2	253
12	0,9	40	1,4	9,01	3,2	197
13	1,0	40	0,6	3,86	4,2	253
14	1,0	50	0,6	6,04	5,8	341
15	1,2	40	1,0	6,44	5,7	340
16	1,2	40	1,4	9,01	3,5	214
17	1,2	50	1,4	14,09	6,6	386
Ср.15-17	1,2	-	-	-	-	313
18	1,3	50	0,6	6,04	6,4	375
19	1,5	50	1,0	10,06	6,2	363
20	1,5	50	1,4	14,09	9,6	552
Ср.19,20	1,5	-	-	-	-	458
21	1,8	40	1,4	9,01	5,6	330
22	1,8	40	1,4	9,01	8,3	480
Ср.21,22	1,8	40	1,4	-	-	405
23	>2	40	1,0	6,44	15,0	851
K – относительное ускорение вибрации; Ср. – средние значения соответствующих позиций.						

Аналогичной обработке подвергались остальные экспериментальные данные. При расчете коэффициента теплоотдачи α_0 по формуле (4) и темпа охлаждения m по (5) принималось: $t_{ж}=255^{\circ}\text{C}$, $t_0=20^{\circ}\text{C}$, $\alpha=10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $F_0 = 0,38 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, что соответствовало эквивалентному диаметру пластинок $d_0=22 \text{ мм}$; $F = F_{\text{общ}} - F_0 = 3,14 \cdot 10^{-3} - 0,38 \cdot 10^{-3} = 2,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $c_p=381 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\rho=8800 \text{ кг}/\text{м}^3$, $V = 6,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Условия проведения опытов и расчетные данные темпа охлаждения m и коэффициентов α_0 приведены в таблице; среднеквадратичные погрешности их определения не превышали 3 и 7% соответственно.

Анализ кривой 1 на рис. 2, а показывает, что она не является строго гладкой, что связано с периодичностью падения капель, а значит и процесса теплообмена. Достигнув поверхности, капля жидкого металла затвердевала в виде пластинки, а затем под действием вибрационных сил отскакивала от поверхности, после чего на ее место падала другая капля. С увеличением частоты падения капель или при параметрах вибрации, не обеспечивающих своевременное удаление затвердевших частиц, наблюдалось образование пластинок удвоенной толщины, которые транспортировались с большей скоростью.

Наконец, при достаточно большой частоте падения капель (в опытах при $v_0 > 2,0$ кап/с) кривые $t = f(\tau)$ были практически гладкими, а затвердевший металл транспортировался в виде более крупных образований. В этом случае интенсивность теплообмена была наибольшей (таблица, поз. 6 и 23).

При падении капель с высоты $h = 360$ мм скорость их в момент соприкосновения с поверхностью α -калориметра составляла $w = 2,66$ м/с. Максимальная скорость перемещения вибрирующей поверхности при $f = 40 \div 50$ Гц и $A = 0,6 \div 1,4$ мм лежала в пределах: $w_{\text{ВИБ}} = 2\pi f = 0,15 \div 0,44$ м/с, т.е. в $6 \div 18$ раз меньше. По-видимому, по этой причине не обнаружено заметного влияния параметров вибрации на процесс теплоотдачи. Основная роль вибрационного воздействия состоит в своевременном удалении затвердевших частиц. Можно отметить также (рис.3), что в опытах с чистой поверхностью α -калориметра ($\times$) коэффициенты теплоотдачи несколько выше, чем для окисленной ($\circ$).

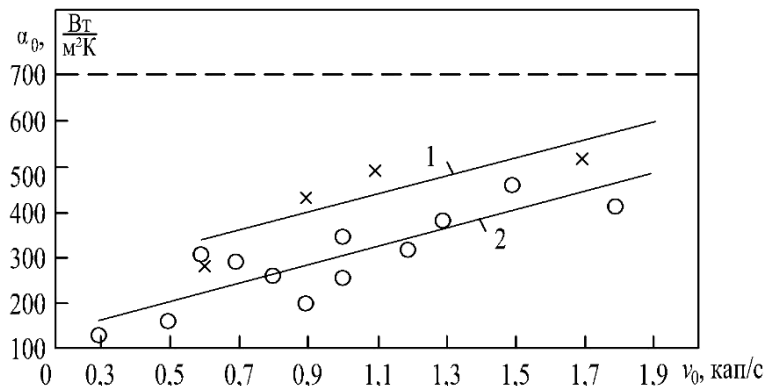


Рис. 3. К обобщению опытных данных; зависимость α_0 от v_0 по данным таблицы;
 $\times$ - чистая поверхность (прямая 1); $\circ$ - окисленная поверхность (прямая 2)

Опытные данные на рис. 3 были обобщены методом наименьших квадратов [15] и представлены уравнениями:

$\alpha_0 = 193 \cdot v_0 + 219$ (прямая 1) и $\alpha_0 = 192 \cdot v_0 + 105$ (прямая 2) для чистой и окисленной поверхности и среднеквадратичной погрешностью 14,3 и 20,5% соответственно. Уравнения справедливы при $v_0 = 0,3 \div 1,9$ кап/с.

При $v_0 > 2$ кап/с коэффициент теплоотдачи следует принимать $\alpha_0 \geq 700$ Вт/(м²·К). Полученные значения коэффициентов теплоотдачи в этом случае хорошо согласуются с данными [10] для свободной струи.

Таким образом, можно считать, что при заданной скорости вибротранспортировки затвердевших частиц основным фактором, влияющим на интенсивность теплообмена, является частота падения капель. Наблюдаемый разброс экспериментальных данных вдоль обобщающих прямых можно отнести на счет различной скорости вибротранспортировки, определяемой параметрами вибрации. Поскольку параметры вибрации влияют в основном на транспортирующую способность, то с целью

упрощения вибропривода установки можно рекомендовать производственную частоту $f = 50$ Гц, а амплитуду $A = 0,6 \div 1,0$ мм.

При термическом вскрытии твэлов транспортирующая поверхность будет одновременно бомбардироваться частицами топлива в виде таблеток диаметром 5,9 мм и длиной $8 \div 10$ мм, плотностью 10 г/см^3 . Согласно литературным данным [16], а также проведенным экспериментам на имитаторах топлива контактный теплообмен несущественен, и процесс охлаждения таких одиночных частиц определяется, в основном, свободной конвекцией и дополнительным влиянием относительного движения их в окружающей газовой среде [17, стр. 315], обусловленного отрывом таблеток от вибрирующей поверхности при ускорении вибрации больше $9,8 \text{ м}^2/\text{с}$. Для ансамбля частиц, движущихся по поверхности слоем высотой в две-три частицы, коэффициенты теплоотдачи достигали величины порядка $30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Следовательно, если для жидких компонентов теплоотдача на вибротранспортирующей поверхности является достаточно высокоэффективным процессом, то для твердых – этот процесс менее интенсивен, и поэтому может быть использован в качестве предварительной стадии охлаждения жидких и твердых компонентов при термическом вскрытии твэлов.

Заключение

1. Показана возможность применения регулярного теплового режима для исследования теплоотдачи для таких сложных процессов, как охлаждение металлических расплавов при их кристаллизации на вибрирующей поверхности.

2. Установлена картина охлаждения расплава в виде потока капель до твердой фазы на наклонной вибротранспортирующей поверхности.

3. Получены экспериментальные данные по теплоотдаче при охлаждении расплава в виде потока одиночных капель и при движении сплошной свободной струи.

4. Обнаружено, что основным фактором, влияющим на интенсивность теплоотдачи при параметрах вибрации и углах наклона, обеспечивающих перемещение твердых образований, является частота падения капель, с ростом которой коэффициент теплоотдачи увеличивается, принимая при $v_0 > 2 \text{ кап/с}$ их значения больше $700 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

5. При термическом вскрытии твэлов охлаждение твердых и жидких компонентов на наклонной вибротранспортирующей поверхности может быть использовано в качестве предварительной стадии процесса.

Summary

Results of experimental investigation of heat-exchange liquid and solid components introduced (in the model materials), formed at thermal opening of the fuel elements on the inclined surface of the vibrotransporter. It was recommended, that when parameters of vibration provided the movement of the solidified particles the required heat-transfer coefficient depends primarily on the frequency of fall drops monotonically increasing with its increase, and to a lesser on the vibration parameters and cleanliness of heat-exchange surface. Receiving results recommended for calculations cooling surface of the liquid and solid components at thermal autopsy of the fuel elements.

Keywords: thermal autopsy, fuel elements, liquid and solid components, crystallization, surface of the vibrotransporter, regular thermal mode, heat-exchange.

Литература

1. Переработка и транспортировка облученных твэлов. Реферат. // Атомная техника за рубежом. 1972. № 6. С. 16–21.

2. Новоселов Г.П., Догаев Ю.Д., Перевозчиков С.А. Потери урана и плутония со сталью в процессе термического вскрытия твэлов. // Атомная энергия. 1974. Т. 36, вып. 1. С. 70–72.
3. Скиба О.В., Барков В.А., Бибииков С.Е., Васильев Г.Д. Вскрытие облученных твэлов реакторов БОР-60 и БР-5 методом оплавления оболочки. Препринт НИИАР-П-17(283). Димитровград, 1976.
4. Скиба О.В., Кислый В.А., Савочкин Ю.П., Вавилов С.К. Пирозлектрические процессы в топливном цикле реакторов на быстрых нейтронах. Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР». 2012.
5. Чемезов В.А., Каримов Р.С., Шенгалс А.А. Пристанционная регенерация облученного мононитридного ядерного топлива реакторов типа БН пирохимическим методом. // Вопросы радиационной безопасности. 2012. № 4. С. 57–59.
6. Салли И.В. Кристаллизация при сверхбольших скоростях охлаждения. Киев: Наукова думка. 1972.
7. Старовойтенко Г.И., Мусиенко В.Т., Бейзеров С.М. Расчет скорости охлаждения частиц расплава при соударении с медной водоохлаждаемой подложкой. // Порошковая металлургия. 1981. № 6. С. 16–21.
8. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. М.: Металлургия. 1982.
9. Иванов О.А., Шейхалиев Ш.М. Расчет скорости охлаждения при закалке из жидкого состояния. // Изв. АН СССР. Металлы. 1985. № 5. С. 70–73.
10. Шестаков Н.И., Шичков А.Н. Теплоотдача от расплавленного металла к твердой фазе при непрерывной разливке // Изв. АН СССР. Металлы. 1984. № 3. С. 85–87.
11. Лукин С.В., Шестаков Н.И., Страшко Т.И., Зверев А.М. Охлаждение и затвердевание металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали // Металлы. 2007. № 3. С. 20–26.
12. Лукин С.В., Плашенков В.В., Образцов М.А., Зимин С.А., Шалкин А.П. Исследование теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения сортовой машины непрерывного литья заготовок // Известия вузов. Черная металлургия. 2009. № 1. С. 47–51.
13. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: ГИТТЛ, Гостехиздат, 1954.
14. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М.-Л.: Энергия, 1964.
15. Кассандрова О.Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы, 1970.
16. Рабинович М.И., Клименко Ю.Г., Островская К.И. Теплообмен вибрирующего слоя из крупных частиц со стенкой аппарата // Теплопроводность и конвективный теплообмен. Киев: Наукова думка, 1980. С.53–56.
17. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена / Пер. с англ. под ред. А.В.Лыкова. М. Л.: Госэнергоиздат, 1961.

Поступила в редакцию

19 апреля 2016 г.

Сапожников Борис Георгиевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» (ТиТ) Уральского энергетического института (УралЭНИИ) Уральского федерального университета (УрФУ). E-mail: bgs0910@mail.ru.

Горбунова Анастасия Михайловна – ассистент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» (ТГиВ) Строительного института Уральского федерального университета (УрФУ). E-mail: anessa86@mail.ru.

Зеленкова Юлия Оттовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» (ТиТ) Уральского энергетического института (УралЭНИИ) Уральского федерального университета (УрФУ). E-mail: jzel63@mail.ru.

Ширяева Нина Павловна – канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» (ТГиВ) Строительного института Уральского федерального университета (УрФУ). E-mail: kafedratgiv@yandex.ru.