

На рис. 3 показано распределение температуры на внутренней (I) и наружной (II) поверхностях камеры при различных скоростях течения пара. С ростом u_∞ при постоянных условиях охлаждения наружной поверхности ($t_{\text{охл}} = 20^\circ\text{C}$, $\bar{\alpha}_{\text{охл}} = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) неизотермичность уменьшается. Так, если при $u_\infty = 5 \text{ м/с}$ неизотермичность внутренней поверхности камеры составила 41, а наружной 29°C , то при $u_\infty = 16 \text{ м/с}$ эти величины равны 29,5 и $21,5^\circ\text{C}$ соответственно. При этом с ростом скорости основного потока повышается общий уровень температуры наружной и внутренней поверхностей камеры.

Разработанная математическая модель позволяет рассчитывать коэффициенты теплоотдачи при конденсации движущегося пара и тепловое состояние кольцевых камер с учетом различных условий охлаждения внешней поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплоотдача при конденсации пара в цилиндрической расточке / В. М. Капинос и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений).—1985.— № 1.— С. 83—88.
2. Капинос В. М., Гура Л. А., Навроцкий В. В. Сопряженная задача теплообмена при конденсации пара внутри горизонтального цилиндра // ИФЖ.—1985.— Т. 48.— № 3.— С. 495—502.
3. Koh J. C. Y. Film condensation in a forced-convection boundary-layer flow.— Int. J. Heat Mass Transfer, 1962.— V. 5.— P. 941—954.
4. Lu D. C., Li S. R. Two-phase boundary layer analysis of condensation on vertical plate fins.— Numerical Methods in Heat Transfer. The winter annual meeting of the ASME, Anaheim, California, December 7—12, 1986, HTD.— Vol. 62.— P. 39—47.
5. Noto K., Matsumoto R. Numerical solution of combined body force and forced flow filmwise condensation.— Computational Mechanics'86, Theory and Applications. Proceedings of International Conference on Computational Mechanics, May 25—29, 1986, Tokyo.— V. VII.— P. 41—46.

Представлена кафедрой
турбиностроения

Поступила 30.03.1988
После доработки 22.07.1988

УДК 621.769.669

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

*Кандидаты техн. наук АБРАМЕНКО А. Н., КАЛИНИЧЕНКО А. С.,
инж. КРИВОШЕЕВ Ю. К.*

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт

В настоящее время находят распространение кристаллизаторы, работающие на принципе центробежных тепловых труб. При получении металлических лент небольшой ширины (до 5 мм) или микропровода для теплосброса можно использовать теплообмен между боковыми стенками и окружающей средой. При этом отпадает необходимость в источниках водоснабжения для конденсатора. Для этого был разработан центробежный кристаллизатор воздушного охлаждения [1], где в качестве капиллярной структуры применены треугольные канавки.

Особенностью кристаллизатора является выполнение боковыми стенками одновременно функций как конденсатора внутри центробежной тепловой трубы, так и теплообменников, омываемых при вращении наружным воздухом. Для увеличения теплообменной поверхности эти стенки сделаны наклонными, для интенсификации теплообмена — оребрены снаружи (рис. 1а, б).

Кристаллизатор работает следующим образом. При его вращении внешний обод захватывает слой расплава. Отдавая теплоту ободу, слой затвердевает, превращаясь в ленту. Рабочая жидкость, капиллярно-за-

помещенная в канавках обода, испаряется, и пар за счет разности давлений между горячим ободом и холодными боковыми стенками устремляется к последним. Там он конденсируется и по канавкам, сформированным на внутренней стороне стенок, центробежными силами подается к испарителю — в канавки обода. Теплота, отданная боковым стенкам при конденсации, поступает в воздух при вращении.

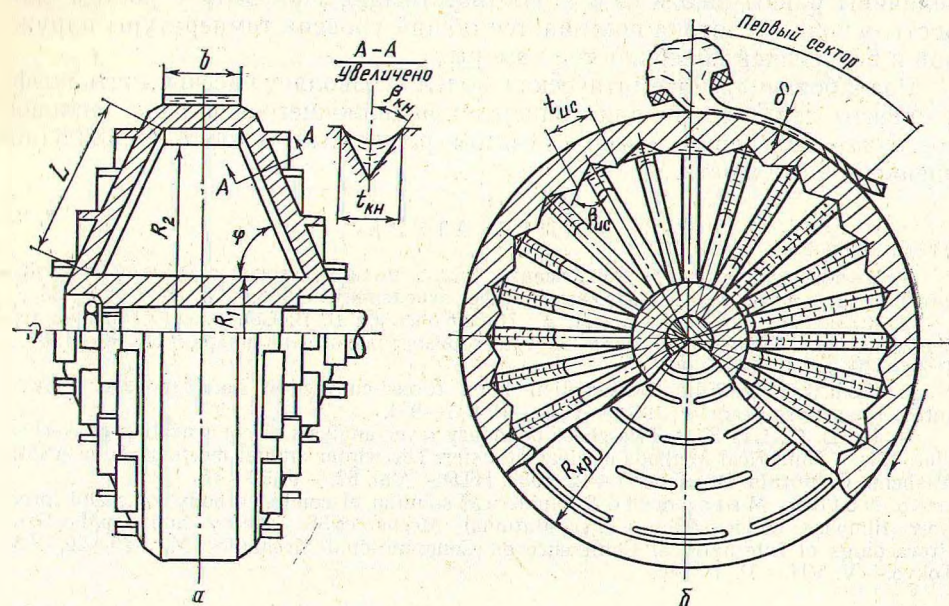


Рис. 1. Схема кристаллизатора для получения металлической ленты методом быстрого охлаждения из жидкого состояния: а — фронтальный вид; б — сбоку

Основная задача — расчет эффективного теплообмена различных процессов, происходящих в кристаллизаторе для определения максимальной ширины получаемой ленты.

Методика расчета включает следующие этапы:

- 1) определение плотности теплового потока в испарителе центробежного кристаллизатора;
- 2) размеров треугольных канавок в конденсаторе и испарителе;
- 3) максимальной ширины металлической ленты, исходя из транспортной способности канавок в конденсаторе и интенсивности теплоотдачи вращающихся ребренных боковых стенок при взаимодействии с воздухом.

Плотность теплового потока, выделившегося при затвердевании и кристаллизации ленты расплава,

$$q = \frac{\delta \rho_p (C_p \Delta T_p + r)}{\tau_p + \tau_k}$$

Значения τ_p находятся как отношение ΔT_p к скорости охлаждения расплава. Время кристаллизации τ_k устанавливается законом выделения скрытой теплоты кристаллизации и тепловым балансом между расплавом и подложкой [2].

Толщина ленты, формируемой на кристаллизаторе [3],

$$\delta = \frac{1}{2\pi l} \sqrt{\frac{\sigma_p \cos \Theta_p}{\rho_p R_{кр}}}$$

Для определения размеров треугольных канавок в конденсаторе, кристаллизатор при квазистационарном режиме работы условно делится на два сектора. На дуге первого — формируется лента, т. е. происходит теп-

лоподвод, а значит осушение канавок, на дуге второго — теплоподвод отсутствует, жидкость переходит из конденсатора в испаритель. Размеры канавок находим из условия их полного осушения под действием центробежных сил за время вращения во втором секторе, ширину канавки — из равенства давлений, возникающего от центробежной силы, и гидравлического сопротивления, определяемого уравнением Гагена — Пуазейля,

$$t_{кн} = \frac{1 + \sin \beta_{кн}}{2\pi \cos \beta_{кн}} \sqrt{\frac{f \mu_{ж}}{\rho_{ж} n (1 - n\tau_{п} - n\tau_{к}) \sin \varphi} \ln \frac{R_2}{R_1}}$$

При этом оптимальное значение полуугла при вершине канавки $\beta_{кн} \approx 20^\circ$ [4]. Число канавок, нарезаемое на боковой стенке кристаллизатора,

$$m = \frac{60R_1}{t_{кн}}$$

Ширину ленты расплава определяем, исходя из транспортной возможности системы треугольных канавок в конденсаторе

$$b_1 = \frac{t_{кн}^2 L \rho_{ж} r^* m \operatorname{ctg} \beta_{кн}}{4\pi R_{кр} \delta \rho_p (C_p \Delta T_p + r)}$$

Для нормального перехода рабочей жидкости из конденсатора в испаритель необходимо совпадение осей их канавок, а, следовательно, и числа канавок. Тогда максимальная ширина канавки в испарителе

$$t_{ис} = \frac{60R_2}{m}$$

Полуугол при вершине находим из условия равенства объемов канавки в испарителе и двух канавок в конденсаторе

$$\beta_{ис} = \operatorname{arccctg} \frac{2t_{кн}^2 L \operatorname{ctg} \beta_{кн}}{t_{ис}^2 b_1}$$

Для определения интенсивности теплообмена при конденсации и при взаимодействии вращающихся ребренных боковых стенок с воздухом необходимо вычислить суммарный перепад, возникающий на различных участках системы «расплав — валок — охлаждающая среда»,

$$\Sigma \cdot \Delta T = T_{ср} - T_в = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4 + \Delta T_5 + \Delta T_6,$$

где ΔT_1 — температурный перепад контакта «жидкометаллическая лента — обод кристаллизатора», полученный решением уравнения контактного теплообмена;

ΔT_2 — температурный перепад по радиусу обода и слою жидкости в канавке испарителя, рассчитываемый численным методом;

ΔT_3 — температурный перепад по пару, которым ввиду малости обычно пренебрегают.

Минимальный температурный перепад между паром и стенкой конденсатора ΔT_4 находим из условия возврата паров рабочей жидкости из испарителя в конденсатор вопреки воздействию центробежных сил. Разность давлений насыщенных паров

$$\Delta p \geq \pi^2 n^2 R_2^2 \rho_{ж} \operatorname{ctg} \beta_{ис}$$

По величине Δp определяем минимальный температурный перепад $\Delta T_{4\min}$.

Коэффициент теплообмена при конденсации на боковых стенках рассчитывается согласно уравнению Нуссельта [5], где вместо гравитационного ускорения вводится среднее значение центростремительного ускорения на боковых стенках.

Из равенства тепловых потоков при конденсации и при теплоотдаче боковых стенок с воздухом имеем

$$\alpha_{кн} \cdot \Delta T_4 A_{кн} = \alpha_в \cdot \Delta T_6 A_в K$$

$$\Delta T_6 = \frac{\alpha_{кн} \cdot \Delta T_4 A_{кн}}{\alpha_b A_6 K}$$

За площадь конденсации $A_{кн}$ принимаем площадь боковых стенок без площади, занятой канавками.

Перепад по оребренной боковой стенке ΔT_5 определяем численным решением уравнения теплопроводности.

Коэффициент теплообмена между вращающимися наклонными боковыми стенками и воздухом [6]

$$\alpha_b = 0,33\lambda_b \left[\frac{2\pi n \sin \varphi}{v_b} \right]^{0,5} K.$$

Тогда тепловой поток, отдаваемый стенками в воздух,

$$Q = 0,66\pi\lambda_b (R_1 + R_2) L \cdot \Delta T_6 \left[\frac{2\pi n \sin \varphi}{v_b} \right]^{0,5} K.$$

Коэффициент K находим эмпирически в зависимости от размера, формы и количества ребер.

Величины температурных перепадов ΔT_4 , ΔT_5 и ΔT_6 получим из решения системы уравнений, составленной при следующих условиях:

а) равенства тепловых потоков, передаваемых при конденсации через стенку в воздух;

б) сумма

$$\Delta T_4 + \Delta T_5 + \Delta T_6 = \Sigma \Delta T - (\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3);$$

в) температурный перепад $\Delta T_4 \geq \Delta T_{4\min}$.

Исходя из величины сбрасываемого теплового потока, уточняем максимальную ширину металлической ленты, а соответственно и кристаллизатора

$$b_2 = \frac{0,66\pi\lambda_b (R_1 + R_2) L \cdot \Delta T_6}{R_{кр} \rho_p (C_p \cdot \Delta T_{п} + r)} \left[\frac{2\pi n L^2 \sin \varphi \rho_p R_{кр}}{v_b \sigma_p \cos \Theta_p} \right]^{0,5} K.$$

Из двух значений b_1 и b_2 выбираем меньшее.

Ограничением теплоотвода в испарителе является кризис теплообмена при кипении в канавках. Для расчета максимальной плотности теплового потока можно рекомендовать следующее соотношение [7], последний член которого учитывает влияние центробежного ускорения [8]:

$$q_{\max} = \frac{t_{ис}^2 r^* \rho_{ж} \sigma_{ж} \cos \Theta_{ж} C(\beta) K(\beta)}{\mu_{ж} \frac{b}{2} \left\{ \frac{(0,01 + b/2)}{\ln \frac{0,01 + b/2}{0,01}} - 0,01 \right\}} \cdot \left(\frac{a}{g} \right)^{0,25},$$

где

$$C(\beta) = \frac{(1 - \sin \beta_{ис}) \cos^2 \beta_{ис}}{2(1 + \sin \beta_{ис})^2 \sin \beta_{ис}};$$

$$K(\beta) = 0,0535 (2\beta_{ис})^{4,55},$$

причем угол $\beta_{ис}$ выражается в радианах.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета центробежного кристаллизатора воздушного охлаждения, на основе которой спроектирован и изготовлен кристаллизатор для получения узких лент из алюминиевых сплавов. Диаметр устройства 0,3 м, диапазон изменения частоты вращения от 30 до 100 с⁻¹. Толщина получаемой ленты от 0,06 до 0,2 мм, ширина 1—2 мм. Наибольшая производительность устройства при ширине ленты 2 мм 325 кг/ч.

2. За счет интенсификации теплоотвода и обеспечения его равномерности конечный продукт имел аморфную структуру, что привело к увеличению предела прочности на 25—30 %, относительного удлинения на 15—20 %.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

A — площадь;
 C — теплоемкость жидкометаллической ленты;
 g — гравитационное ускорение;
 K — коэффициент, учитывающий интенсификацию теплообмена за счет оребрения стенки;
 n — частота вращения кристаллизатора;
 L — длина боковой стенки;
 R_1 — радиус ступицы;
 R_2 — внутренний радиус кристаллизатора;
 r — скрытая теплота кристаллизации;
 r^* — скрытая теплота парообразования;
 α — коэффициент теплообмена;
 Θ — контактный угол смачивания;
 μ — динамическая вязкость;
 ν — кинематическая вязкость;
 σ — поверхностное натяжение;
 ρ — плотность;
 τ — время;
 φ — угол наклона боковой стенки.
 Индексы:
 б — боковые стенки;
 в — воздух;
 ж — рабочая жидкость;
 к — кристаллизация;
 кн — конденсация;
 кр — кристаллизатор;
 п — перегрев расплава;
 р — расплав;
 ср — средняя расплава;
 max — максимальный;
 min — минимальный.
 Размерность в системе СИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устройство для получения металлической ленты методом быстрого охлаждения из жидкого состояния. Полож. решение № 4334576/31 от 26.11.87 / А. Н. Абраменко, А. С. Калининско и др.
2. Приближенный метод расчета процесса формирования тонкой заготовки при закалке из жидкого состояния / Э. А. Гурич, И. П. Жмакин, А. С. Калининско и др. // Металлургия. — Минск: Вышэйшая школа, 1988. — С. 88—90.
3. Методика расчета толщины и охлаждения лент, получаемых сверхбыстрым охлаждением металла из жидкого состояния / А. Н. Абраменко, А. С. Калининско и др. // ИФЖ. — 1988. — Т. 55. — № 1. — С. 117—122.
4. Бреслер Р., Уайт П. Смачивание поверхности с помощью капиллярных канавок // Тр. Амер. об. инж.-мех. Сер. С. Теплопередача. — 1970. — Т. 92. — № 2. — С. 126—132.
5. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975. — 272 с.
6. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. — М.: Атомиздат, 1979. — 80 с.
7. Васильев Л. Л., Абраменко А. Н., Капончик Л. Е. Теплообмен при испарении и кипении жидкости в канавках тонкопленочных испарителей // Ракетная техника и космонавтика. — 1979. — № 12. — С. 110—118.
8. Тонг Л. Теплоотдача при кипении и двухфазное течение. — М.: Мир, 1969. — С. 57—60.

Представлена кафедрой
 промтеплоэнергетики и теплотехники

Поступила 24.07.1989
 После доработки 2.10.1989