

А.Н. Абреченко, А.С. Калиниченко, Ю.К. Кривошеев

ПРИБЛИЖЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ РАБОТЫ
ЦЕНТРОБЕЖНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА

При получении металлических лент небольшой ширины (до 5 мм) или микропровода широкого распространение находят кристаллизаторы, в основе работы которых лежит принцип центробежных тепловых труб. Такие кристаллизаторы позволяют использовать для отвода тепла теплообмен между боковыми стенками и окружающей средой, при этом отпадает необходимость в источниках водоснабжения. Реализация такого кристаллизатора представлена в /1/, где в качестве капиллярной структуры применены треугольные канавки (см. рис.).

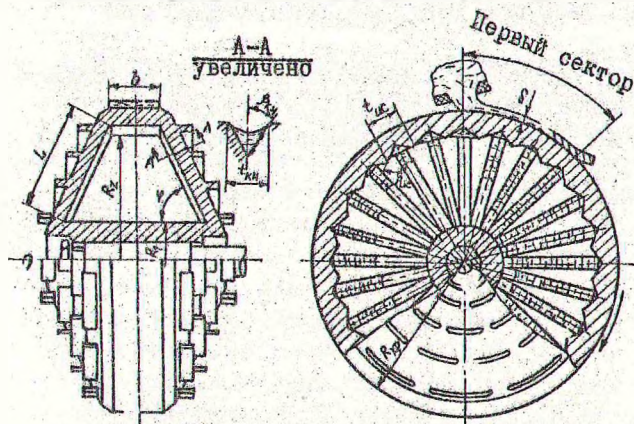


Рис. Общий вид кристаллизатора

Особенностью кристаллизатора является выполнение боковыми стенками одновременно функций конденсатора внутри центробежной тепловой трубы и теплообменников, омываемых при вращении наруж-

ным воздухом. Для увеличения теплообменной поверхности эти стенки отделаны наклонными, для интенсификации теплообмена — оребрены снаружи.

Кристаллизатор работает следующим образом. При его вращении внешний обод захватывает слой расплава. Отдавая тепло ободу, оной затвердевает, превращаясь в ленту. Рабочая жидкость, капиллярно-зацементированная в канавках обода, испаряется и пар за счет разности давления 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. Тепло, отданное боковым стенкам при конденсации, сбрасывается в воздух при вращении.

Основной задачей расчета является определение интенсивности теплообмена различных процессов, происходящих в кристаллизаторе, с целью выяснения максимально возможной ширины получаемой ленты.

Методика расчета включает следующие этапы:

1. Определение плотности теплового потока в испарителе центробежного кристаллизатора.
2. Определение размеров треугольных канавок в конденсаторе и испарителе.
3. Определение максимальной ширины металлической ленты, исходя из транспортной способности канавок в конденсаторе и интенсивности теплосброса вращающихся оребренных боковых стенок при взаимодействии с воздухом.

Плотность теплового потока, выделившегося при затверждении и кристаллизации ленты расплава, можно выразить следующим образом:

$$q = \frac{\delta(c_p \Delta T_n + r) \rho_p}{\tau_n + \tau_k},$$

где τ_n находится как соотношение ΔT_n к скорости охлаждения расплава, а время кристаллизации τ_k определяется законом выделения скрытой теплоты кристаллизации и из условия теплового баланса между расплавом и подложкой /2/. Толщина ленты, формируемой на кристаллизаторе /3/

$$\delta = \frac{t}{2\pi n} \sqrt{\frac{\sigma_p \cos \theta_p}{\rho_p R_{кр}}}$$

Для определения размеров треугольных канавок в конденсаторе кристаллизатор условно делится на два сектора. На дуге первого сектора формируется лента, при этом происходит теплоподвод, а значит осушение канавок; на дуге второго теплоподвод отсутствует, жидкость переходит из конденсатора в испаритель. Размеры канавок находятся из условия их полного осушения во втором секторе под действием центробежных сил за время вращения. Ширина канавки определяется из равенства давления, возникающего от центробежной силы, и гидравлического сопротивления, определяемого уравнением Гагена-Пуазейля

$$t_{кн} = \frac{1 + \sin \beta_{кн}}{2\pi \cos \beta_{кн}} \sqrt{\frac{f \mu_{ж}}{\rho_{ж} n (1 - n \tau_n - n \tau_k) \sin \varphi}} l_n \frac{R_2}{R_1},$$

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

$$m = \frac{60R_1}{t_{кн}}.$$

Ширина ленты расплава находится исходя из транспортной возможности системы треугольных канавок в конденсаторе:

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

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 определяется из условия равенства объемов канавки в испарителе и двух канавок в конденсаторе:

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

Для определения интенсивности теплообмена при конденсации и при взаимодействии вращающихся обретенных боковых стенок с воздухом необходимо определить суммарный перепад, возникающий на различных участках системы "расплаз - валок - охлаждающая среда":

$$\sum \Delta T = \Delta T_{ср} - T_8 = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4 + \Delta T_5 + \Delta T_6,$$

где ΔT_1 - температурный перепад контакта "жидкометаллическая лента - обод кристаллизатора", определяемый 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, которм ввиду малости обычно пренебрегают.

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

Разность давления насыщенных паров

$$\Delta P \geq \pi^2 n^2 R_2 t_{ис} \rho_{ж} c_{тг} \beta_{ис}$$

По величине ΔP определяется минимальный температурный перепад ΔT_{4min} .

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

$$\alpha_{кн} \Delta T_4 A_{кн} = \alpha_6 \Delta T_6 A_6 K$$

или

$$\Delta T_6 = \frac{\alpha_{кн} \Delta T_4 A_{кн}}{\alpha_6 A_6 K}$$

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

Величины температурных перепадов ΔT_4 , ΔT_5 и ΔT_6 определяются решением системы уравнений, составленной при следующих условиях: равенства тепловых потоков, передаваемых при конденсации

через стенку и сбрасываемых в воздух;

$$\Delta T_4 + \Delta T_5 + \Delta T_6 = \sum \Delta T - \Delta T_1 - \Delta T_2 - \Delta T_3,$$

температурный перепад

$$\Delta T_4 \geq \Delta T_{4min}$$

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

Очевидно, что ширина ленты определяет количество теплоты, которое требуется отвести от боковых стенок кристаллизатора в воздух, поэтому для интенсификации теплоотдачи боковая поверхность кристаллизатора должна быть пластинчато-ребристой, поскольку при движении воздуха вдоль поверхности ребер периодически образуются вихри, интенсифицирующие теплоотдачи. Коэффициент теплообмена между воздухом и ребрами, расположенными на вращающейся наклонной боковой поверхности /6/,

$$\alpha_{16} = 0,078 \rho_6 c_6 (\pi n L \sin \varphi)^{0,75} \left(\frac{\nu_6}{P} \right)^{0,25} \left(\frac{d}{h} \right)^{0,32},$$

а коэффициент теплообмена между вращающейся боковой наклонной поверхностью и воздухом /7/

$$\alpha_{26} = 0,33 \lambda_6 \left(\frac{2\pi n \sin \varphi}{\nu_6} \right)^{0,5}$$

Тепловой поток, отводимый от стенок и ребер в воздух,

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

где коэффициент K имеет вид

$$K = \frac{\alpha_{26} [\pi (R_1 + R_2) L - A_1] + \alpha_{16} A_2}{\alpha_{26} \pi (R_1 + R_2) L}$$

Исходя из величины отводимого теплового потока, уточняется максимальная ширина металлической ленты, а соответственно и кристаллизатора:

$$b_2 = \frac{0,66 \pi (R_1 + R_2) L \Delta T_6 \lambda_b \left(\frac{2 \pi n \sin \varphi \rho_{кр} R_{кр} L^2}{\nu_b \sigma_b \cos \vartheta_p} \right)^{0,5}}{R_{кр} \rho_{кр} (c_p \Delta T_n + r)} K$$

Из двух значений b_1 и b_2 выбирается меньшее.

Ограничением теплосъема в испарителе является кризис теплообмена при кипении в канавках. Для расчета максимальной плотности теплового потока можно рекомендовать следующее соотношение [8], последний член которого учитывает влияние центростремительного ускорения [9]:

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

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

$$K(\beta) = 0,0535 (2 \beta_{ис})^{1,55}$$

Угол $\beta_{ис}$ выражается в радианах.

Обозначения

A - площадь; A_1 - площадь основания ребер; A_2 - площадь поверхности ребер; a - центростремительное ускорение; C - теплоемкость жидкометаллической ленты; d - расстояние между ребрами; g - гравитационное ускорение; ξ - коэффициент сопротивления движению жидкости в канавках; h - высота ребра; K - коэффициент, учитывающий интенсификацию теплообмена за счет сребрения стенки; L - длина боковой стенки; n - частота вращения кристаллизатора; D - диаметр ребра; 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.

Литература

1. Положительное решение по заявке № 4334576/31-02/ 174365 от 26.II.87 (СССР). Устройство для получения металлической ленты методом быстрого охлаждения из жидкого состояния / А.Н. Абра -

- менко, А.С. Калиниченко и др.
2. Ямакин Н.П., Калиниченко А.С. и др. Приближенный метод расчета процесса формирования тонкой ваготовки при закалке из жидкого состояния // *Металлургия*. - Минск, 1986. - С. 88-90. - (Республ. межвед. сб. науч. тр.).
 3. Абраменко А.Н., Калиниченко А.С. и др. Методика расчета толщины и охлаждения лент, получаемых сверхбыстрым охлаждением металла из жидкого состояния // *ИФЖ*. - 1988. - Т. 55, № 1. - С. 117-122.
 4. Бреслер Р., Уайт П. Смачивание поверхности с помощью капиллярных канавок // *Теплопередача*. - 1970. - Т. 92, № 2. - С. 126-132.
 5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. *Теплопередача*. - М.: Энергия, 1975. - 487 с.
 6. Ройзен Л.И., Дулькин И.Н. *Тепловой расчет оребренных поверхностей* / Под ред. В.Р. Фастовского. - М.: Энергия, 1977. - 256 с.
 7. Уонг Х. *Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров*. - М.: Атомиздат, 1979. - 213 с.
 8. Васильев Л.Л., Абраменко А.Н., Канончик Л.Е. Теплообмен при испарении и кипении жидкости в канавках топочных испарителей // *Ракетная техника и космонавтика*. - 1979. - Т. 17, № 12. - С. 110-118.
 9. Тонг Л. *Теплоотдача при кипении и двухфазное течение*. - М.: Мир, 1969. - 344 с.