

# **ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭНЕРГО- И ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ**

Сухоцкий А. Б., доцент, к. т. н. ;  
Кунтыш В.Б., профессор, д. т. н. ;



Сегодня в Беларуси, России, Казахстане в эксплуатации находится порядка 52-55 тысяч АВО с общей электрической мощностью 1 961 МВт.

Основным климатическим параметром, по которому рассчитываются площадь теплопередачи АВО и мощность вентилятора, является температура  $t_p$  охлаждающего воздуха на входе, за которую при тепловом расчете принимают среднюю температуру воздуха в 13 ч дня для наиболее жаркого месяца в году.

Опыт эксплуатации АВО показал, что при температуре окружающего воздуха  $-25^{\circ}\text{C}$  и ниже тепловой поток полностью отводится естественной конвекцией охлаждающего воздуха через аппарат.

## Цель работы:

1. разработка алгоритма, который позволит персоналу предприятия самостоятельно производить расчеты температуры воздуха отключения вентилятора при сохранении исходного проектной тепловой мощности аппарата;
2. разработка конструктивных устройств, которые смогут обеспечить расчетную теплопроизводительность АВО при более высокой температуре окружающего воздуха с отключенным вентилятором.

*Потенциал энергосбережения (отключение вентилятора на 1 месяц в году) = 1 961 000 × 720 = 1 412 10<sup>6</sup> кВт ч.*

## Метод расчета.

$$Q = k F \Delta t_{\tilde{\delta}} \quad (1)$$

$$Q = G_1 c_1 (t_1' - t_1'') \quad (2)$$

$$Q = G_1 (h_1' - h_1'') \quad (3)$$

Задают температуру наружного воздуха  $t_0$ , °C.

$$t_1 = 0,5(t_1' + t_1'') \quad (4)$$

$$t_1 = t_0 + (t_1' - t_1'') / \ln \left[ (t_1' - t_0) / (t_1'' - t_0) \right] \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{\hat{e}} + \alpha_{\ddot{e}} \quad (6)$$

$$\alpha_{\hat{e}} = (\text{Nu } \lambda) / d_0 \quad (7)$$

Принимают предварительно температуру поверхности БРТ у основания ребер равной средней температуре охлаждаемого теплоносителя  $t_{\text{CT}} = t_1$

$$\Delta t_{\tilde{n}\ddot{o}} = t_1 - t_0 \quad (8)$$

$$\text{Ra} = \frac{g \beta (t_{\tilde{n}\ddot{o}} - t_0) d_0^3}{\nu a} \quad (9)$$

$$\text{Nu} = A \text{Ra}^n (1 - \exp(-B / \text{Ra})) \quad (10)$$

## Упрощенный способ расчета коэффициента теплоотдачи излучением.

$$\alpha_{\ddot{e}} = \frac{Q_{\ddot{e}}}{F \cdot (t_{\ddot{n}0} - t_0)} = \frac{c_0 \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{\text{т-с}} \varphi_{\text{а-т}}}{(t_{\ddot{n}0} - t_0)} \left[ \left( \frac{273 + t_{\ddot{n}0}}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + t_0}{100} \right)^4 \right] \quad (11)$$

где  $c_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты системы тел «пучок – среда»;  $\varphi_{\text{т-с}}$  – средний угловой коэффициент излучения одиночной круглорезистой трубы к окружающей среде;  $\varphi_{\text{а-т}}$  – средний угловой коэффициент излучения пучка из гладких труб диаметром  $d$  к окружающей среде.

Справедливость произведения подтверждается нашими опытными исследованиями, выполненными методом светового моделирования для пучков АВО из орребренных труб с  $s/d_0 = 0,1$ .

$$\varphi_{\hat{o}\hat{1}} = \frac{(s - \varphi_{\hat{1}\hat{1}}(s - \Delta))d}{(d^2 - d_0^2)/2 + (s - \Delta)d_0 + \Delta d} \quad (12)$$

где  $\varphi_{\hat{o}\hat{1}}$  – угловой коэффициент излучения на себя цилиндрической поверхности диаметром  $d$  и длиной  $(s - \Delta)$ , замыкающей межреберную полость.

$$\varphi_{\hat{1}1-\hat{1}1} = 1 - R + \frac{H}{4} + \frac{2R}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{2\sqrt{1-R^2}}{H} \right) + \frac{H}{2\pi} \arcsin(1-2R^2) - \frac{\sqrt{H^2+4}}{2\pi} \left[ \frac{\pi}{2} + \arcsin \left( 1 - \frac{2R^2 H^2}{H^2 - 4R^2 + 4} \right) \right], \quad (13)$$

где  $R = d_0/d$ ;  $H = 2(s - \Delta)/d$ .

Для труб АВО может быть принято  $\varphi_{o1-o1} = 0,02-0,04$ .

$$\varphi_{\tilde{a}\hat{1}} = \frac{2\sigma_1}{\pi z} \left[ 1 - \left( \sqrt{1 - \frac{1}{\sigma_1^2}} - \frac{1}{\sigma_1} \operatorname{arctg} \sqrt{\sigma_1^2 - 1} \right)^z \right] \quad (14)$$

где  $\sigma_1 = S_1 / d$ .

$$\varepsilon_{i\delta} = \left[ 1 + \left( 1 / \varepsilon_{y\hat{o}} - 1 \right) \varphi_{\tilde{a}\hat{i}} \right]^{-1} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{y\hat{o}} = \left[ 1 + \left( \frac{1}{\varepsilon_{\delta}} - 1 \right) \varphi_{\delta\hat{i}} \right]^{-1} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{\delta} = \left( 175,7 - 0,17 \cdot t_{\tilde{n}\hat{o}} \right) \cdot 10^{-3} \quad (17)$$

# Общий способ расчета коэффициента теплоотдачи излучением.

(18)

$$\alpha_{\ddot{e}} = \frac{c_0 \varepsilon_{\ddot{i} \delta} \Phi_{\delta-\hat{i}}}{(t_{\ddot{n}\delta} - t_0)} \frac{(\hat{O}_{1-3} + \hat{O}_{2-3}(z-1))}{z} \left[ \left( \frac{273 + t_{\ddot{n}\delta}}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + t_0}{100} \right)^4 \right]$$

где  $\Phi_{1-3}$ ,  $\Phi_{2-3}$  – разрешающий угловой коэффициент излучения от первой зоны к третьей и от второй зоны к третьей, соответственно.

$$\hat{O}_{1-3} = \left[ \varphi_{1-3} + (1 - \varepsilon_{\hat{y}\delta}) (\varphi_{1-2} \varphi_{2-3} - \varphi_{1-3} \varphi_{2-2}) \right] / M \quad (19)$$

$$\hat{O}_{2-3} = \left[ \varphi_{2-3} + (1 - \varepsilon_{\hat{y}\delta}) (\varphi_{2-1} \varphi_{1-3} - \varphi_{2-3} \varphi_{1-1}) \right] / M \quad (20)$$

$$M = \left[ 1 - (1 - \varepsilon_{\hat{y}\delta}) \varphi_{1-1} \right] \left[ 1 - (1 - \varepsilon_{\hat{y}\delta}) \varphi_{2-2} \right] - (1 - \varepsilon_{\hat{y}\delta})^2 \varphi_{1-2} \varphi_{2-1} \quad (21)$$

На основании свойств угловых коэффициентов получены формулы:

$$\varphi_{1-1} = 1 - \varphi_{1-2} - \varphi_{1-3}$$

$$\varphi_{1-2} = 1 - \varphi_{1-3} - \varphi_{\dot{a}-\dot{a}} - \frac{\pi}{2\sigma_1} (\varphi_{\dot{a}-d})^2 (\varphi_{c-d})^{z-2}$$

$$\varphi_{1-3} = \varphi_{a-c} + \varphi_{a-d} (\varphi_{c-d})^{z-1} \quad (22)$$

$$\varphi_{2-1} = \varphi_{1-2} / (z - 1)$$

$$\varphi_{2-2} = 1 - \varphi_{2-1} - \varphi_{2-3}$$

$$\varphi_{2-3} = \frac{2\sigma_1}{\pi(z-1)} \left( 1 - (\varphi_{c-d})^z - \varphi_{1-3} \frac{\pi}{2\sigma_1} \right),$$

где вспомогательные угловые коэффициенты

$$\varphi_{a-a} = \frac{2}{\pi} \left( 1 + 2\sigma_1 \sqrt{1 - \frac{1}{\sigma_1}} - 2\sigma_1 + \arcsin \left( \frac{1}{2\sigma_1 - 1} \right) \right)$$

$$\varphi_{a-\tilde{n}} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{\pi}{4} + \sigma_1 - \sigma_1 \sqrt{1 - \frac{1}{\sigma_1}} - \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{1}{2\sigma_1 - 1} \right) \right) \quad (23)$$

$$\varphi_{a-d} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \left( 2\sigma_1 \sqrt{1 - \frac{1}{\sigma_1}} - 2\sqrt{\sigma_1^2 - 1} - 2 \arcsin \left( \frac{1}{\sigma_1} \right) + 2 \arcsin \left( \frac{1}{2\sigma_1 - 1} \right) \right)$$

$$\varphi_{\tilde{n}-d} = \sqrt{1 - \frac{1}{\sigma_1^2}} - \frac{1}{\sigma_1} \arctg \sqrt{\sigma_1^2 - 1}$$

Вычисляют по известным зависимостям коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) от охлаждаемого теплоносителя (технологического продукта) к внутренней поверхности несущей трубы.

Назначают по рекомендациям значение контактного термического сопротивления  $R_k$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт, для типа БРТ, примененной в рассчитываемом аппарате.

$$k = \left[ \varphi \frac{d_0}{d_1} \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\tilde{n}\tilde{o}}}{\lambda_{\tilde{n}\tilde{o}}} + R_1 \right) + \varphi \frac{d_0}{d_i} \left( \frac{\delta_{\tilde{a}}}{\lambda_{\tilde{a}}} + R_{\tilde{e}} \right) + \frac{1}{\alpha_2} + R_2 \right]^{-1}$$

Вычисляют расчетную тепловую нагрузку  $Q_p$  аппарата

Уточняют температуру поверхности трубы по основанию ребер со стороны воздуха

$$t_{\tilde{n}\delta} = t_0 + Q_{\delta} / (\alpha_2 F)$$

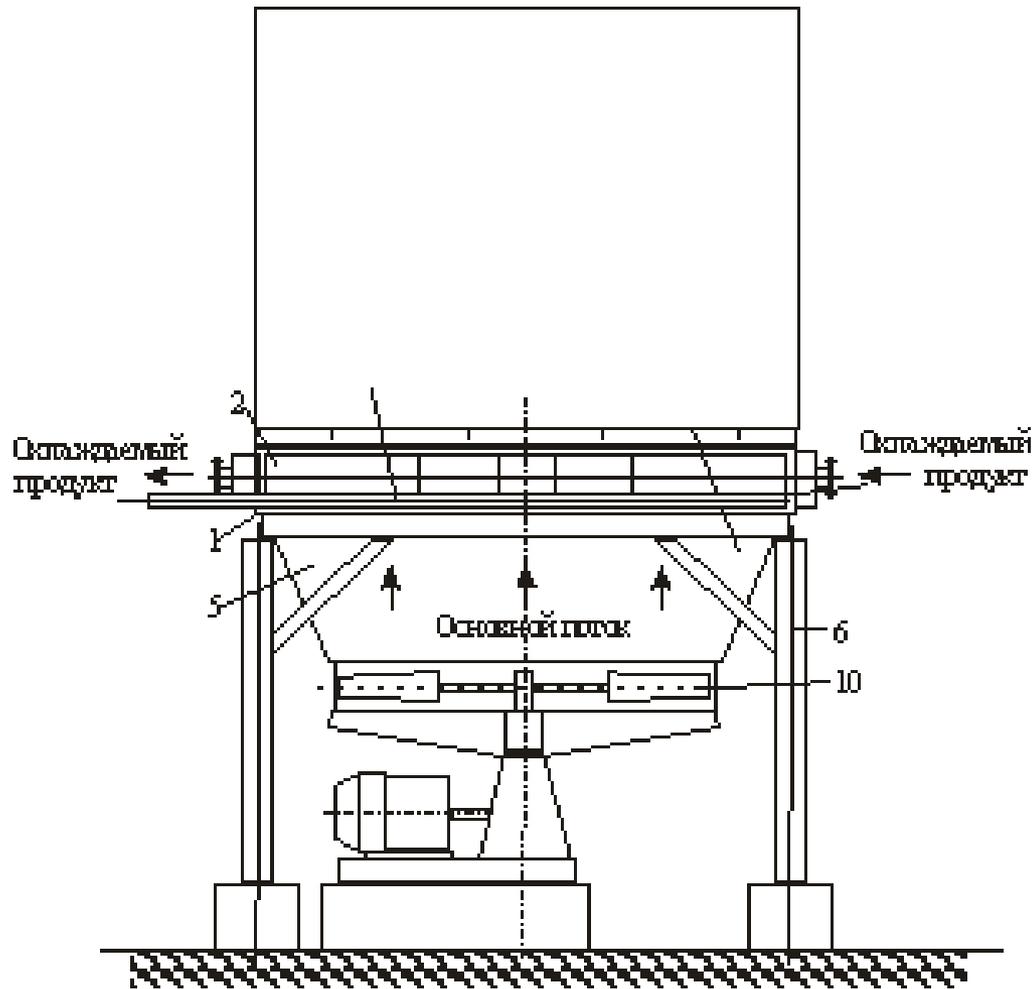
Вычисляют невязку теплового потока

$$\delta Q = (|Q_{\delta} - Q_{\acute{a}}| / Q_{\acute{a}}) \cdot 100$$

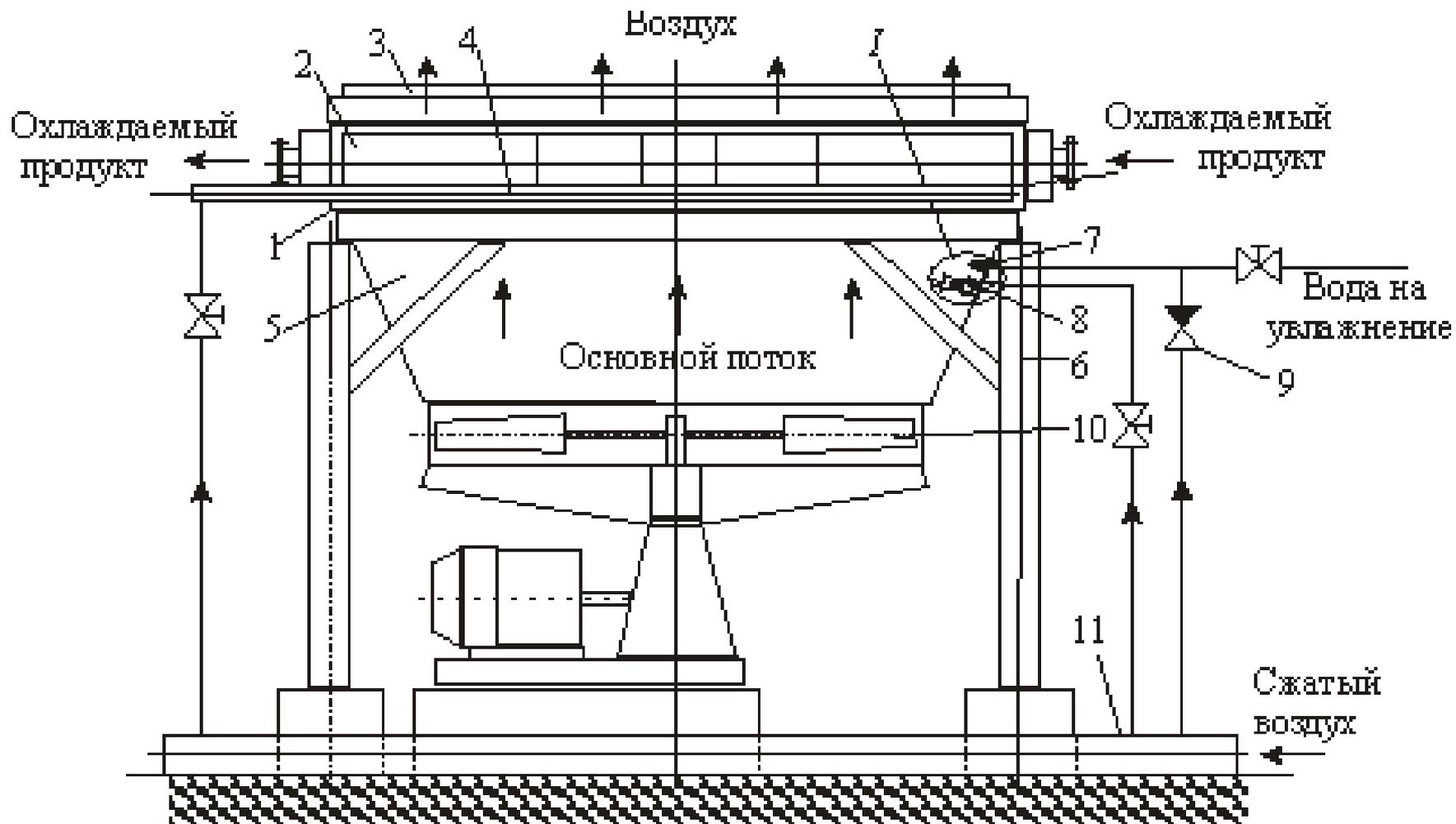
где  $Q_{\delta}$  – тепловой поток, вычисленный по уравнению (2) или (3) теплового баланса.

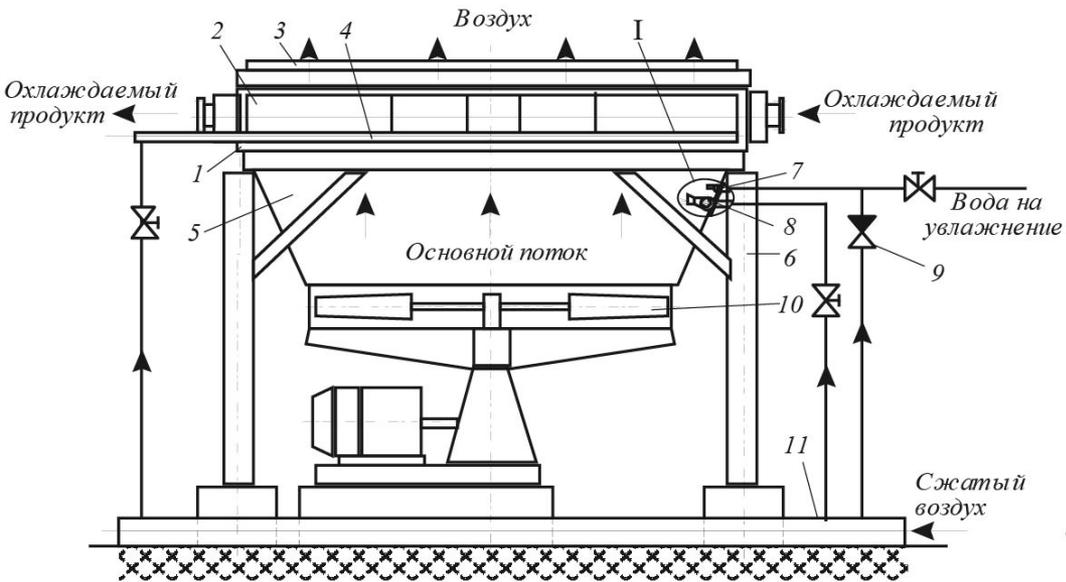
Если  $\delta Q > 1\%$ , то необходимо переназначить значение температуры  $t_0$  и повторить расчет. Если  $\delta Q \leq 1\%$ , то расчет считают окончанным.

# Разработка энергосберегающих конструкций.

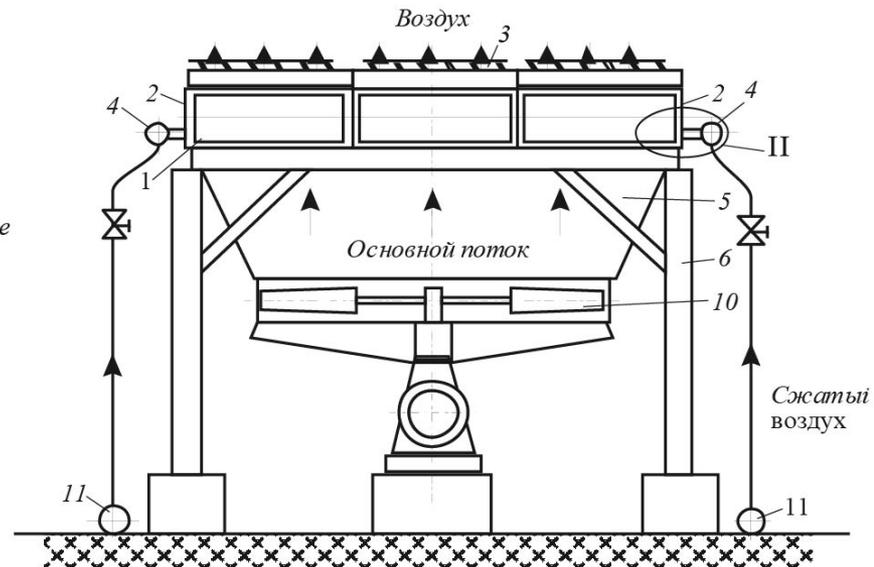


# Аппарат воздушного охлаждения

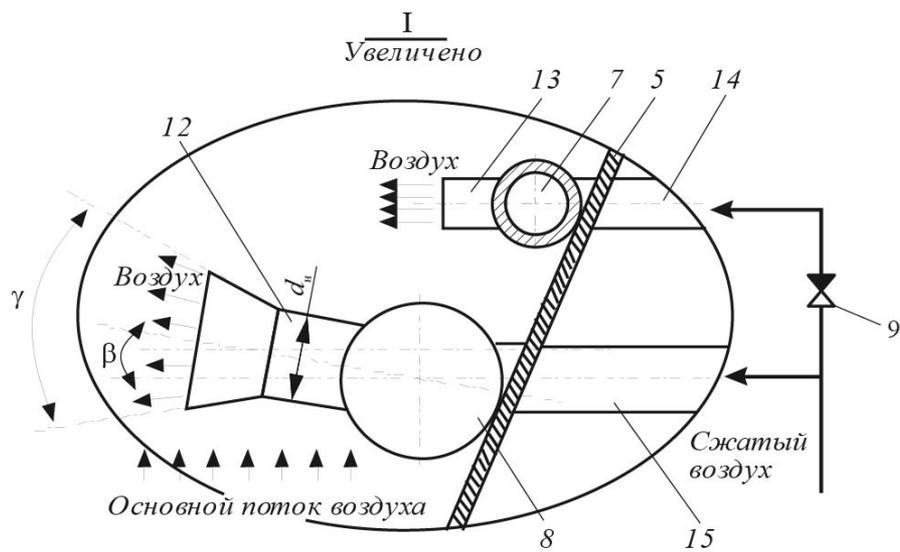




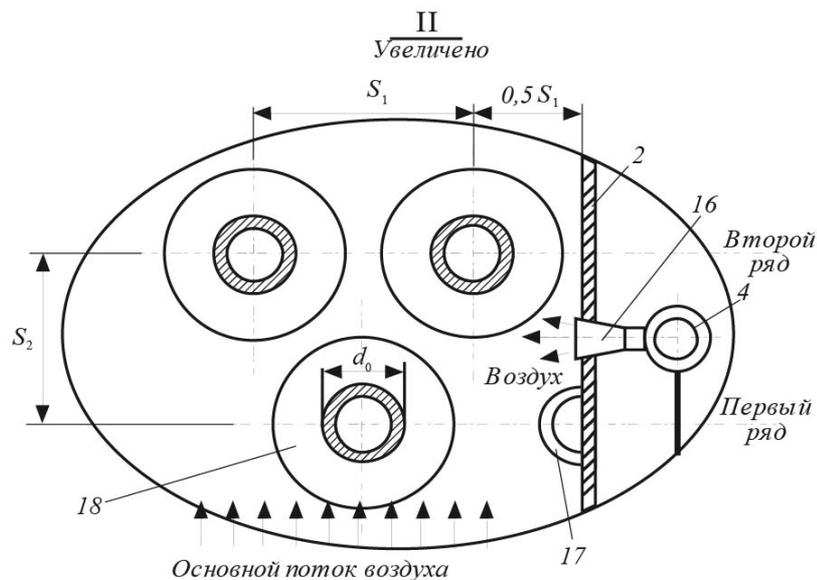
*a*



*б*

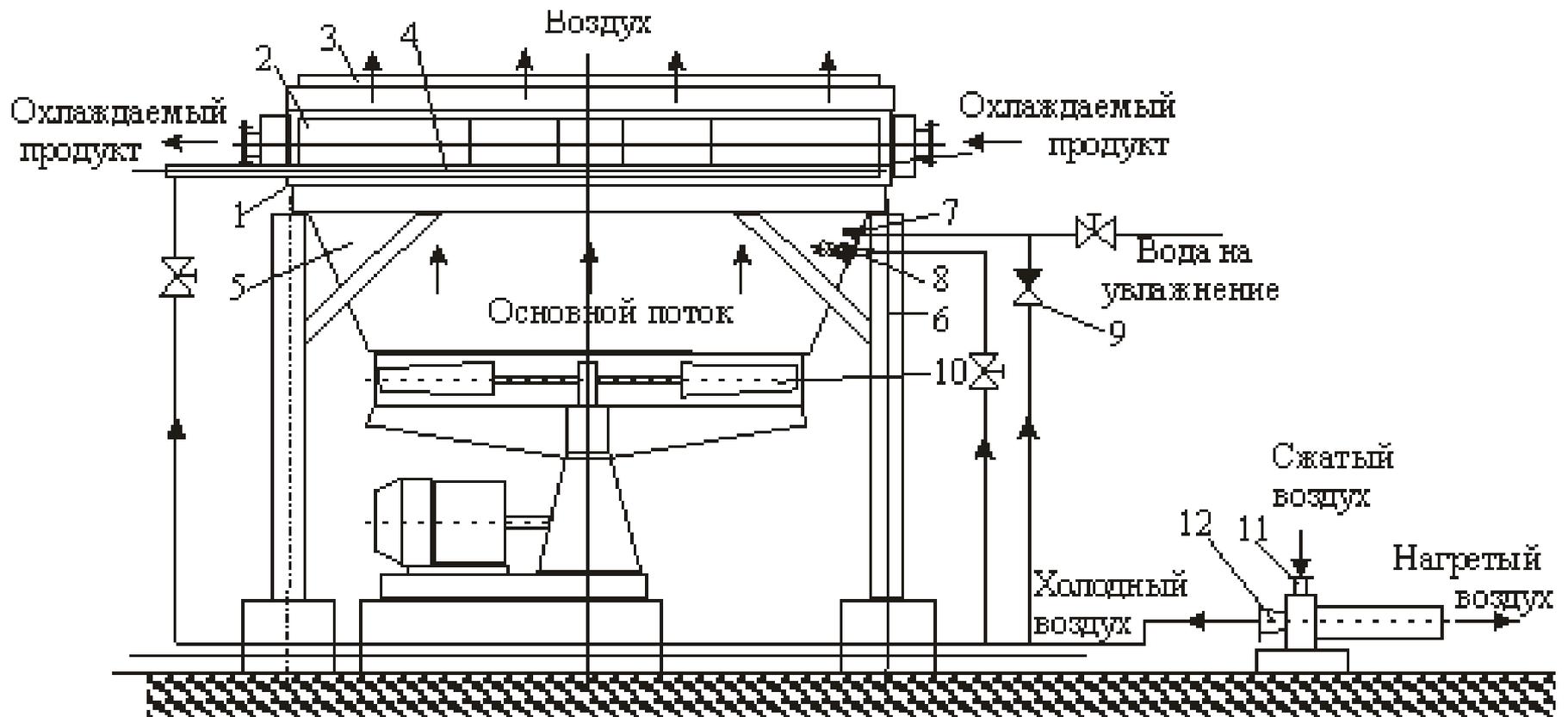


*в*



*г*

# Аппарат воздушного охлаждения



Фиг. 1

**Спасибо за внимание.**