

3 АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Аэродинамическое сопротивление на пути прохождения газов в газоходах котельной установки составляется из местных сопротивлений, зависящих от изменения сечений газоходов и их поворотов, и из сопротивления, возникающего вследствие трения и вследствие сопротивления пучков труб.

Необходимое разрежение, создаваемое тяговым устройством, зависит от суммы сопротивлений отдельных элементов, входящих в состав котельной установки, Па [7, с. 137]:

$$\Delta h_{\text{кy}} = \Delta h_{\text{т}} + \Delta h_{\text{к}} + \Delta h_{\text{эк}} + \Delta h_{\text{зас}} + \Delta h_{\text{бор}} + \Delta h_{\text{д.тр}}, \quad (3.1)$$

где $\Delta h_{\text{т}}$ – сопротивление в топочном пространстве котла, Па;

$\Delta h_{\text{к}}$ – сопротивление газохода конвективного пучка, Па;

$\Delta h_{\text{эк}}$ – сопротивление водяного экономайзера, Па;

$\Delta h_{\text{зас}}$ – сопротивлениешибера, установленного на газоходе перед дымососом, Па;

$\Delta h_{\text{бор}}$ – сопротивление борова, Па;

$\Delta h_{\text{д.тр.}}$ – сопротивление дымовой трубы, Па.

Согласно рекомендациям [7, с. 144] принимаем:

$\Delta h_{\text{зас}}=1,5$ мм вод. ст.=14,71 Па;

$\Delta h_{\text{бор}}=12$ мм вод. ст.=117,68 Па.

					ДП 1-43 01 05.21.61.13					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						
Разраб.		Чижик А.В.			АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Овсянник А.В.								
Консульт.		Овсянник А.В.								
Н. контр.		Вальченко Н.А.								
Зав. каф.		Шаповалов А.В.								
						ГГТУ им. П.О. Сухого кафедра ПТЭиЭ				

3.1 Расчёт аэродинамического сопротивления котельного агрегата ДЕ-6,5-14ГМ

Сопротивление котельного агрегата можно определить, исходя из выражения (3.1):

$$\Delta h_{\text{кот}}^{\text{п}} = \Delta h_{\text{т}} + \Delta h_{\text{к}} + \Delta h_{\text{эк}}, \quad (3.2)$$

где $\Delta h_{\text{т}}=49,03$ Па – сопротивление в топочном пространстве котла;

$\Delta h_{\text{к}}$ – сопротивление конвективного пучка, Па;

$\Delta h_{\text{эк}}$ – сопротивление водяного экономайзера, Па.

3.1.1 Аэродинамическое сопротивление конвективного пучка

Конструктивные характеристики газохода котельного агрегата [1, таблица 2.9]:

- поперечный шаг труб: $S_1=110$ мм;
- продольный шаг труб: $S_2=110$ мм;
- число рядов труб по ходу продуктов сгорания: $z_2=26$ шт.;
- наружный диаметр и толщина стенки трубы: $d = 51 \times 2,5$ мм;
- площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания:
 $F=0,348$ м².

Подсчитываем относительный шаг [1, с. 72]:

– поперечный: $\sigma_1 = \frac{S_1}{d} = \frac{110}{51} = 2,16;$ (3.3)

– продольный: $\sigma_2 = \frac{S_2}{d} = \frac{110}{51} = 2,16.$ (3.4)

Средняя температура дымовых газов [1, с. 72]:

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{\theta' + \theta''}{2} = \frac{1082 + 314}{2} = 698 \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (3.5)$$

где θ' – температура дымовых газов на входе в конвективный пучок, $^\circ\text{C}$

					ДП 1-43 01 05.21.61.13	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

(принимается согласно раздела 2);

θ'' – температура дымовых газов на выходе из конвективного пучка, °C
(принимается согласно раздела 2).

Рассчитываем среднюю скорость продуктов сгорания в поверхности нагрева [7, с. 137]:

$$w_{cp} = \frac{B_p \cdot V_z \cdot (\theta_{cp} + 273)}{F \cdot 273} = \frac{0,148 \cdot 11,894 \cdot (698 + 273)}{0,348 \cdot 273} = 17,96 \text{ (м/с)}, \quad (3.6)$$

где B_p – расчётный расход топлива, м³/с;

V_z – объём продуктов сгорания [таблица 2.2], м³/м³;

F – площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания, м².

Коэффициент сопротивления одного ряда коридорного пучка определяется по формуле [7, с. 139]:

$$\xi_o = \xi_{cp} \cdot c_s = 0,44 \cdot 0,62 = 0,27, \quad (3.7)$$

где ξ_{cp} – коэффициент сопротивления коридорного пучка [7, рисунок 5.2.а];

c_s – поправочный коэффициент на расстояние между трубами [7, рисунок 5.2.б];

Определяем коэффициент сопротивления для коридорного расположения труб [7, с. 138]:

$$\xi_k = \xi_o \cdot z_2 = 0,27 \cdot 26 = 7,09, \quad (3.8)$$

где z_2 – число рядов труб по ходу продуктов сгорания.

Плотность дымовых газов при средней температуре [7, с. 142]:

$$\rho_{cp} = \rho_o \frac{\theta_o}{273 + \theta_{cp}} = 1,34 \frac{273}{273 + 698} = 0,38 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \quad (3.9)$$

где ρ_i – приведённая плотность дымовых газов при 760 мм. рт. ст. и 0°C, кг/м³;

θ_{cp} – средняя температура дымовых газов, °C.

Сопротивление конвективного пучка без учёта местных сопротивлений [7, с. 139]:

					ДП 1-43 01 05.21.61.13	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\Delta h_{\text{кп}} = \xi_{\text{к}} \cdot \frac{w_{\text{ср}}^2 \cdot \rho_{\text{ср}}}{2} = 7,09 \cdot \frac{17,96^2 \cdot 0,38}{2} = 430,95 \text{ (Па)}. \quad (3.10)$$

Местные сопротивления определим по следующей формуле [7, с. 137]:

$$\Delta h_{\text{м}} = \xi_{\text{пов}} \cdot \frac{w_{\text{ср}}^2 \cdot \rho_{\text{ср}}}{2} = 6 \cdot \frac{17,96^2 \cdot 0,38}{2} = 364,55 \text{ (Па)}, \quad (3.11)$$

где $\xi_{\text{пов}}$ – значение коэффициента местного сопротивления для двух поворотов на 90° и 180° [7, с. 137].

Полное сопротивление конвективного пучка [7, с. 139]:

$$\Delta h_{\text{к}} = \Delta h_{\text{кп}} + \Delta h_{\text{м}} = 430,95 + 364,55 = 795,5 \text{ (Па)}. \quad (3.12)$$

3.1.2 Аэродинамическое сопротивление водяного экономайзера

Конструктивные характеристики водяного экономайзера принимаем по данным теплового расчёта котельного агрегата ДЕ-6,5-14ГМ (раздел 2 данного проекта):

- длина труб $l_{\text{тр}} = 2000$ мм;
- количество труб в ряду $z_1 = 4$ шт.;
- количество рядов труб $z_2 = 9$ шт.;
- количество труб $n = 36$ шт.;
- площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания

$$F_{\text{тр}} = 0,12 \text{ м}^2.$$

Средняя температура дымовых газов будет равна [1, с. 92]:

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{\theta_{\text{с1}} + \theta_{\text{с2}}}{2} = \frac{314 + 162}{2} = 238 \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (3.13)$$

где $\theta_{\text{с1}}$ – температура дымовых газов на входе в экономайзер, $^\circ\text{C}$ (принимается согласно раздела 2);

$\theta_{\text{с2}}$ – температура дымовых газов на выходе из экономайзера, $^\circ\text{C}$ (принимается согласно раздела 2).

					ДП 1-43 01 05.21.61.13	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Рассчитываем среднюю скорость продуктов сгорания в поверхности нагрева по формуле (3.6):

$$w_{\text{cp}} = \frac{B_p \cdot V_r \cdot (\theta_{\text{cp}} + 273)}{F \cdot 273 \cdot z_1} = \frac{0,148 \cdot 12,619 \cdot (238 + 273)}{0,12 \cdot 273 \cdot 4} = 7,27 \text{ (м/с)}, \quad (3.14)$$

где B_p – расчётный расход топлива, м³/с;

V_r – объём продуктов сгорания [таблица 2.2], м³/м³;

F – площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания, м²;

z_1 – количество труб в ряду.

Плотность дымовых газов при средней температуре согласно формуле (3.9) будет равна:

$$\rho_{\text{cp}} = \rho_o \frac{\theta_o}{273 + \theta_{\text{cp}}} = 1,34 \frac{273}{273 + 238} = 0,72 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

Соппротивление водяного экономайзера определим по формуле [7, с. 144]:

$$\Delta h_{\text{эк}} = 0,5 \cdot n \cdot \frac{w_{\text{cp}}^2 \cdot \rho_{\text{cp}}}{2} = 0,5 \cdot 36 \cdot \frac{7,27^2 \cdot 0,72}{2} = 340,53 \text{ (Па)}, \quad (3.15)$$

где n – количество труб.

Тогда сопротивление котельного агрегата ДЕ-6,5-14ГМ можно определить, исходя из выражения (3.2):

$$\Delta h_{\text{кот}}^{\text{п}} = 49,03 + 795,5 + 340,53 = 1185,06 \text{ (Па)}.$$

3.2 Расчёт аэродинамического сопротивления котельного агрегата КВ-ГМ-4,65-150

Соппротивление котельного агрегата можно определить, исходя из выражения (3.1):

$$\Delta h_{\text{кот}}^{\text{б}} = \Delta h_{\text{т}} + \Delta h_{\text{ш}}, \quad (3.16)$$

где $\Delta h_{\text{т}} = 78,45$ Па – сопротивление в топочном пространстве котла;

$\Delta h_{\text{ш}}$ – сопротивление конвективного пучка, Па;

					ДП 1-43 01 05.21.61.13	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.2.1 Аэродинамическое сопротивление конвективного пучка

Конструктивные характеристики газохода котельного агрегата [6, таблица 8.30]:

- поперечный шаг труб $S_1=54$ мм;
- продольный шаг труб $S_2=40$ мм;
- число труб в ряду $z_1=23$ шт.;
- число рядов труб по ходу продуктов сгорания $z_2=7$ шт.;
- наружный диаметр и толщина стенки трубы $d = 28 \times 3$ мм;
- площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания $F=0,54$ м².

Используя формулы (3.3) и (3.4) подсчитываем относительный шаг:

– поперечный: $\sigma_1 = \frac{S_1}{d} = \frac{54}{28} = 1,93;$

– продольный: $\sigma_2 = \frac{S_2}{d} = \frac{40}{28} = 1,43.$

Средняя температура дымовых газов согласно формуле (3.5) будет равна:

$$\theta_{cp} = \frac{1084,4 + 145}{2} = 614,7 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Рассчитываем среднюю скорость продуктов сгорания в поверхности нагрева по формуле (3.6):

$$w_{cp} = \frac{0,102 \cdot 11,894 \cdot (614,7 + 273)}{0,54 \cdot 273} = 7,3 \text{ (м/с)}.$$

Плотность дымовых газов при средней температуре согласно формуле (3.9) будет равна:

$$\rho_{cp} = \rho_o \frac{\theta_o}{273 + \theta_{cp}} = 1,34 \frac{273}{273 + 614,7} = 0,41 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

Сопротивление шахматного пучка будет равно [7, стр.139]:

$$\Delta h_{\text{шп}} = \Delta h_{\text{тр}} \cdot c_s \cdot c_d \cdot (z_2 + 1) = 15,69 \cdot 1 \cdot 1,05 \cdot (7 + 1) = 131,8 \text{ (Па)}, \quad (3.17)$$

					ДП 1-43 01 05.21.61.13	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где $\Delta h_{\text{тр}} = 15,69$ Па – сопротивление отдельных элементов установки, связанное с трением газов о стенки труб и прямых каналов [7, рисунок 5.3];

$c_s = 1,02$ – поправочный коэффициент на расстояние между трубами [7, рисунок 5.3];

$c_d = 1,05$ – поправочный коэффициент на диаметр труб [7, рисунок 5.3].

Местные сопротивления в газоходе определим по формуле (3.11):

$$\Delta h_{\text{м}} = \xi_{\text{пов}} \cdot \frac{w_{\text{ср}}^2 \cdot \rho_{\text{ср}}}{2} = 1 \cdot \frac{7,5^2 \cdot 0,41}{2} = 11,5 \text{ (Па)},$$

где $\xi_{\text{пов}}$ – значение коэффициента местного сопротивления для поворота на 90° [7, с. 137].

Полное сопротивление шахматного конвективного пучка [7, с. 139]:

$$\Delta h_{\text{ш}} = \Delta h_{\text{шп}} + \Delta h_{\text{м}} = 131,8 + 11,5 = 143,3 \text{ (Па)}. \quad (3.18)$$

Тогда сопротивление котельного агрегата КВГМ-4,65-95 можно определить, исходя из выражения (3.16):

$$\Delta h_{\text{кот}}^{\text{в}} = 78,45 + 143,3 = 221,75 \text{ (Па)}.$$

3.2 Аэродинамическое сопротивление дымовой трубы

Аэродинамическое сопротивление дымовой трубы вызывается трением газов о стенки и потерей давления при выходе газов из трубы в атмосферу; его определяют из уравнения, Па [7, с. 145]:

$$\Delta h_{\text{д.тр.}} = \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{вых}} - \Delta h_{\text{см.т}}, \quad (3.19)$$

где $\Delta h_{\text{тр}}$ – сопротивление трения дымовой трубы, Па;

$\Delta h_{\text{вых}}$ – потеря при выходе газов из дымовой трубы, Па;

$\Delta h_{\text{см.т.}}$ – самотяга дымовой трубы, Па.

Плотность дымовых газов при средней температуре равна [7, с. 142]:

					ДП 1-43 01 05.21.61.13	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\rho_{cp} = \rho_o \frac{273}{273 + t_{yx}} = 1,34 \cdot \frac{273}{273 + 162} = 0,84 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right), \quad (3.20)$$

где ρ_o – приведённая плотность дымовых газов при 760 мм. рт. ст. и 0°C, кг/м³;

t_{yx} – температура уходящих дымовых газов.

Средняя скорость дымовых газов в трубе [7, с. 137]:

$$w_{cp} = \frac{4 \cdot B_{\text{общ}} \cdot V_{\Gamma} \cdot (t_{yx} + 273)}{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot 273} = \frac{4 \cdot (2 \cdot 0,102 + 2 \cdot 0,148) \cdot 11,894 \cdot (162 + 273)}{\pi \cdot 0,7^2 \cdot 273} = 24,6 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right),$$

где $B_{\text{общ}}$ – суммарный расход топлива всеми котельными агрегатами, м³/с;

V_{Γ} – удельный объём продуктов сгорания [таблица 2.2];

$d_{\text{тр}}$ – диаметр устья дымовой трубы, м (принят из расчёта вредных выбросов).

Сопротивление трения дымовой трубы равно [7, с. 139]:

$$\Delta h_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{H_{\text{тр}}}{d_{\text{тр}}} \cdot \frac{w_{cp}^2}{2} \cdot \rho_{cp} = 0,01 \cdot \frac{15}{0,7} \cdot \frac{24,6^2}{2} \cdot 0,84 = 54,53 \text{ (Па)}, \quad (3.21)$$

где $\lambda = \frac{0,361}{\sqrt[4]{\text{Re}}} = \frac{0,361}{\sqrt[4]{8,08 \cdot 10^5}} = 0,01$ – коэффициент трения [7, с. 139];

$$\text{Re} = \frac{w_{cp} \cdot d_{\text{тр}}}{\nu_{cp}} = \frac{24,4 \cdot 0,7}{30,33 \cdot 10^{-6}} = 5,6 \cdot 10^5 \text{ – число Рейнольдса};$$

ν_{cp} – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

$H_{\text{тр}}$ – высота дымовой трубы (принята из расчёта вредных выбросов).

Потеря при выходе газов из дымовой трубы [7, с. 145]:

$$\Delta h_{\text{вых}} = \frac{1,1 \cdot w_{cp}^2}{2} \cdot \rho_{cp} = \frac{1,1 \cdot 24,4^2}{2} \cdot 0,84 = 275,06 \text{ (Па)}. \quad (3.22)$$

Самотяга дымовой трубы [7, с. 143]:

$$\Delta h_{\text{см.т.}} = H_{\text{тр}} \cdot (\rho_{\text{в}} - \rho_{cp}) \cdot g = 15 \cdot (1,3 - 0,84) \cdot 9,81 = 67,69 \text{ (Па)}, \quad (3.23)$$

					ДП 1-43 01 05.21.61.13	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где $\rho_e = 1,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность наружного воздуха [7, с. 143];

$g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ – ускорение свободного падения.

Аэродинамическое сопротивление дымовой трубы согласно формуле (3.19) будет равно:

$$\Delta h_{\text{д.тр.}} = 54,53 + 275,06 - 67,69 = 261,9 \text{ (Па)}.$$

Аэродинамическое сопротивление паровой части котельной найдём по уравнению (3.1):

$$\begin{aligned} \Delta h_{\text{ку}}^{\text{п}} &= \Delta h_{\text{кот}}^{\text{п}} + \Delta h_{\text{зас}} + \Delta h_{\text{бор}} + \Delta h_{\text{д.тр.}} = \\ &= 1185,06 + 14,71 + 117,68 + 261,9 = 1579,35 \text{ (Па)}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Аэродинамическое сопротивление водогрейной части котельной согласно уравнению (3.1) будет равно:

$$\begin{aligned} \Delta h_{\text{ку}}^{\text{в}} &= \Delta h_{\text{кот}}^{\text{в}} + \Delta h_{\text{зас}} + \Delta h_{\text{бор}} + \Delta h_{\text{д.тр.}} = \\ &= 221,75 + 14,71 + 117,68 + 261,9 = 616,04 \text{ (Па)}. \end{aligned} \quad (3.25)$$

					ДП 1-43 01 05.21.61.13	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		