

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ДЫМОХОДА ОТ КОТЛОВ С ОТКРЫТОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ.

При эксплуатации маломощных теплогенераторов большое значение имеет правильно спроектированный и смонтированный дымоход. Расчет дымоходов бывает конструкционный и поверочный.

Конструкционный представляет собой последовательность вложенных итераций (т.е. в начале расчета задают параметры: материал дымохода, скорость дымовых газов, высота и т.д., а потом путем последовательных приближений уточняют эти значения).

На практике гораздо чаще приходится сталкиваться с необходимостью поверочного расчета дымохода, так как обычно котел к существующей дымоходной системе. В этом случае у нас уже есть высота дымовой трубы, материал, площадь сечения дымохода и т.д.

Задача стоит проверить совместимость параметров дымового канала и теплогенератора.

Необходимым условием корректной работы дымохода является превышение самотяги над потерями напора в дымоходе на величину минимально допустимого разрежения в дымоотводящем патрубке теплогенератора.

ВЕЛИЧИНА ЕСТЕСТВЕННОЙ ТЯГИ ЗАВИСИТ ОТ ФАКТОРОВ:

- формы поперечного сечения дымохода (прямоугольная, круглая и т.д.);
- температуры дымовых газов на выходе из теплогенератора;
- материала дымохода (нержавеющая сталь, кирпич и т.д.);
- шероховатости внутренней поверхности дымохода;
- неплотностей газохода, при сочленениях элементов (трещины в покрытии и т.п.);
- параметров наружного воздуха (температура, влажность);
- высоты над уровнем моря;
- параметров вентиляции помещения, где установлен котел;
- качества настройки теплогенератора — полноты сгорания топлива (соотношения топливо/воздух);
- типа работы горелки (модуляционный или дискретный);
- степени загрязнения элементов газо — воздушного тракта (котла и дымохода).

ВЕЛИЧИНА САМОТЯГИ.

Величину самотяги можно проиллюстрировать на примере рис. 1.

Как видно из формулы (1), основную переменную составляющую образует плотность дымовых газов и воздуха, которые являются функциями от их температуры:

$$h_c = H_d \times (\rho_b - \rho_r), \text{мм.вод.ст.} \quad (1)$$

где h_c — величина самотяги;

H_d — эффективная высота дымохода;

ρ_b — плотность воздуха;

ρ_r — плотность дымовых газов.

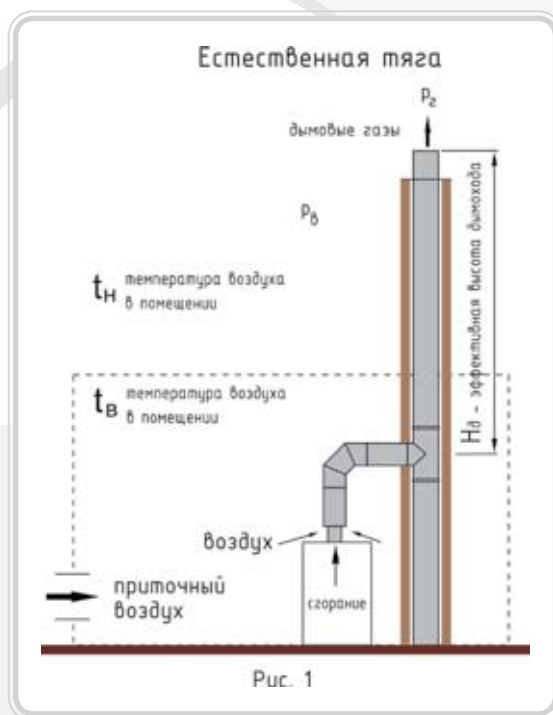
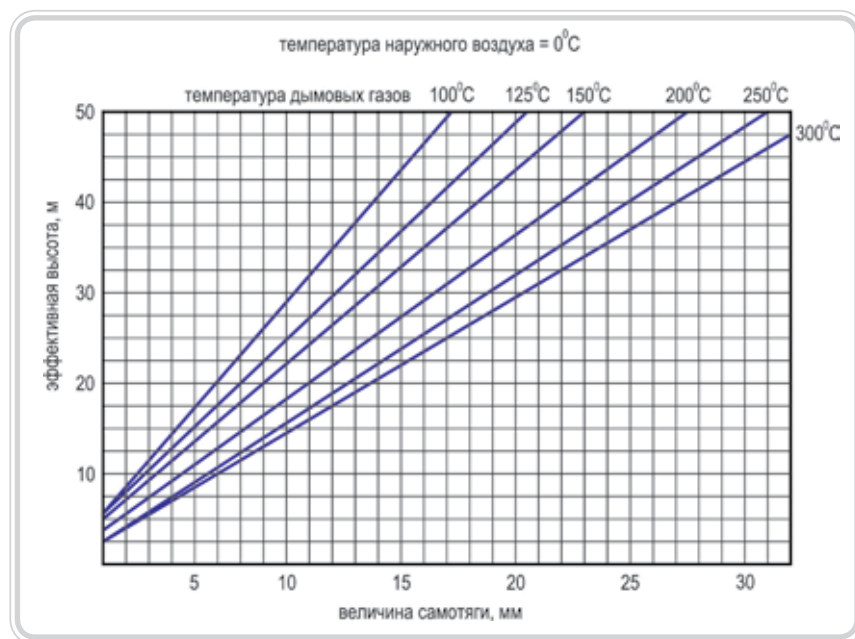


Рис. 1

На графике 1 показана зависимость величины самотяги от температуры дымовых газов.

ГРАФИК 1. ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ САМОТЯГИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ И ВЫСОТЫ ДЫМОХОДА



На практике гораздо чаще встречаются случаи, когда изменяется не только температура дымовых газов, но и температура воздуха. В таблице 1 приведены величины удельной самотяги на один метр высоты дымовой трубы в зависимости от температуры продуктов сгорания и воздуха.

ТАБЛИЦА 1

Средняя температура дыма, °С	Значение удельной самотяги на 1 метр дымохода при различных температурах наружного воздуха, мм Н ₂ О					
	-10	-5	0	10	20	30
100	0,396	0,371	0,347	0,301	0,258	0,219
120	0,444	0,419	0,395	0,349	0,306	0,267
140	0,488	0,463	0,438	0,393	0,349	0,310
160	0,527	0,502	0,478	0,432	0,389	0,350
180	0,563	0,538	0,514	0,468	0,425	0,386
200	0,596	0,571	0,547	0,501	0,458	0,419
220	0,626	0,601	0,577	0,532	0,489	0,477
240	0,654	0,629	0,605	0,559	0,516	0,499
260	0,680	0,665	0,631	0,585	0,542	0,503
280	0,704	0,679	0,655	0,609	0,566	0,527
300	0,726	0,701	0,677	0,631	0,588	0,549
320	0,747	0,722	0,689	0,652	0,609	0,570
340	0,767	0,742	0,717	0,672	0,628	0,589
360	0,785	0,760	0,736	0,690	0,646	0,607
380	0,802	0,777	0,753	0,707	0,664	0,625
400	0,818	0,793	0,769	0,723	0,680	0,641

Таблица дает весьма приблизительный результат и для более точной оценки (во избежание интерполирования значений) необходимо подсчитывать реальные значения плотности продуктов сгорания и окружающего воздуха.

Определим плотность воздуха при рабочих условиях:

$$\rho_a = \rho_{\text{н}}^a \times \frac{273}{273 + t_{\text{oc}}}, \text{ кг/м}^3 \quad (2)$$

где, t_{oc} — температура окружающей среды, °C (принимается для наихудших условий работы оборудования летнего времени; при отсутствии данных принимается 20 °C);

$\rho_{\text{н}}^a$ — плотность воздуха при нормальных условиях — 1,2932 кг/м³.

Определим плотность дымовых газов при рабочих условиях:

$$\rho_r = \rho_{\text{н}}^r \times \frac{273}{273 + \vartheta_{\text{ср}}}, \text{ кг/м}^3 \quad (3)$$

где, $\rho_{\text{н}}^r$ — плотность продуктов сгорания при нормальных условиях, при $\rho = 1,2$ для природного газа можно принять 1,26 кг/м³, для удобства обозначим, $\alpha = 1/273$, тогда:

$$\rho = \frac{\rho_{\text{н}}^r}{1 + \alpha t} \quad (4)$$

где $1 + \alpha t$ — температурная составляющая.

Для упрощения операций будем считать плотность дымовых газов равной плотности воздуха и сводим все значения плотности, приведенные к нормальным условиям на промежутке $t = -20 + 400$ °C, в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. ЗНАЧЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА, ПРИВЕДЕННЫЕ К РАБОЧИМ УСЛОВИЯМ

t, °C	1+αt	$\frac{1,2932}{1+\alpha t}$	t, °C	1+αt	$\frac{1,2932}{1+\alpha t}$	t, °C	1+αt	$\frac{1,2932}{1+\alpha t}$
-20	0,9267	1,3955	7	1,0257	1,2607	90	1,3296	0,9726
-19	0,9304	1,3901	8	1,0293	1,2563	95	1,3480	0,9592
-18	0,9340	1,3845	9	1,0330	1,2519	100	1,3663	0,9464
-17	0,9377	1,3791	10	1,0367	1,2472	110	1,4024	0,9217
-16	0,9414	1,3738	11	1,0403	1,2431	120	1,4395	0,8982
-15	0,9450	1,3683	12	1,0440	1,2387	130	1,4762	0,8760
-14	0,9487	1,3631	13	1,0477	1,2343	140	1,5128	0,8548
-13	0,9524	1,3579	14	1,0513	1,2300	150	1,5494	0,8346
-12	0,9560	1,3527	15	1,0550	1,2258	160	1,5860	0,8153
-11	0,9597	1,3475	16	1,0587	1,2216	170	1,6227	0,7968
-10	0,9634	1,3424	17	1,0623	1,2174	180	1,6593	0,7792
-9	0,9670	1,3373	18	1,0660	1,2131	190	1,6960	0,7624
-8	0,9707	1,3323	19	1,0696	1,2090	200	1,7326	0,7463
-7	0,9744	1,3272	20	1,0733	1,2049	210	1,7692	0,7309
-6	0,9780	1,3223	25	1,0916	1,1847	220	1,8058	0,7160
-5	0,9817	1,3173	30	1,1100	1,1650	230	1,8425	0,7018
-4	0,9853	1,3124	35	1,1282	1,1462	240	1,8791	0,6881
-3	0,9890	1,3076	40	1,1466	1,1278	250	1,9157	0,6750
-2	0,9927	1,3027	45	1,1648	1,1102	260	1,9523	0,6623
-1	0,9963	1,2979	50	1,1831	1,0930	270	1,9890	0,6500
0	1,0000	1,2932	55	1,2014	1,0763	280	2,0256	0,6384
1	1,0037	1,2884	60	1,2197	1,0601	290	2,0627	0,6269
2	1,0073	1,2838	65	1,2381	1,0444	300	2,0989	0,6160
3	1,0110	1,2791	70	1,2564	1,0292	320	2,1721	0,5952
4	1,0147	1,2744	75	1,2747	1,0144	340	2,2454	0,5759
5	1,0183	1,2699	80	1,2930	1,0000	360	2,3186	0,5576
6	1,0220	1,2654	85	1,3113	0,9861	380	2,3919	0,5405

ПРАКТИЧЕСКОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ САМОТЯГИ.

Для вычисления естественной тяги необходимо уточнить среднюю температуру газов в трубе $\vartheta_{\text{ср}}$. Температура на входе в трубу ϑ_1 определяется из паспортных данных оборудования. Температуру продуктов сгорания на выходе из устья дымохода ϑ_2 находят с учетом их охлаждения по длине трубы.

Охлаждение газов в трубе на 1 метр её высоты определяется по формуле:

$$\Delta\vartheta = \frac{B}{\sqrt{\frac{Q}{1000}}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

где, Q — номинальная тепловая мощность котла, кВт;
 B — коэффициент:
 0,85 — неизолированная металлическая труба;
 0,34 — изолированная металлическая труба;
 0,17 — кирпичная труба с толщиной кладки до 0,5 метра.

Температура на выходе из трубы:

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 - H_{\text{д}} \times \rho \vartheta \quad (6)$$

где, $H_{\text{д}}$ — эффективная высота дымовой трубы в метрах.

Средняя температура продуктов сгорания в дымоходе:

$$\vartheta_{\text{ср}} = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7)$$

На практике величину самотяги просчитывают для следующих граничных условий:

- для температуры наружного воздуха 20 °С (летний режим работы теплогенератора);
- если летняя расчетная температура наружного воздуха отличается более чем на 10 °С от 20 °С, то принимается расчетная температура;
- если теплогенератор эксплуатируется только в зимний период, то расчет ведется по средней температуре за отопительный период.

Для примера возьмем установку со следующими параметрами (рис. 2):

- мощность 28 кВт;
- температура дымовых газов 125 °С;
- высота дымовой трубы 8 м (выполнена из кирпича).

Охлаждение газов в трубе на 1 метр её высоты:

$$\rho \vartheta = \frac{0,17}{\sqrt{\frac{28}{1000}}} = 1,016 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Температура дымовых газов на выходе из трубы:

$$\vartheta_2 = 125 - 8 \times 1,016 = 117 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Средняя температура продуктов сгорания в дымоходе:

$$\vartheta_{\text{ср}} = \frac{125 + 117}{2} = 121 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Величина самотяги:

$$h_{\text{с}} = 8 \times (1,029 - 0,8982) = 2,4536 \text{ мм вод.ст.}$$



ВЫЧИСЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ДЫМОВОГО КАНАЛА.

Первый вариант определения диаметра дымохода.

Диаметр трубы принимается либо по паспортным данным (по диаметру выходного патрубка из котла) в случае монтажа отдельной дымовой трубы к каждому котлу, либо по формуле при объединении нескольких котлов в общий дымоход (суммарная мощность до 755 кВт):

$$F = \frac{1000}{1,163} \times \frac{\gamma \times Q}{\sqrt{H_d}}, \text{ см}^2$$

Для цилиндрических труб определяется диаметр:

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}$$

γ — коэффициент, зависящий от вида используемого топлива:

газ — $\gamma = 0,016$; жидкое топливо — $\gamma = 0,024$; уголь — $\gamma = 0,030$; дрова — $\gamma = 0,045$.

Второй вариант определения диаметра дымохода (с учетом скорости продуктов сгорания).

Согласно Norma UNI-CTI 9615, площадь поперечного сечения дымохода можно вычислить по формуле:

$$F = \frac{m_d^{\gamma}}{\rho_r \times w_r}, \text{ м}^2$$

где, m_d^{γ} — массовый расход продуктов сгорания, кг/час.

Для примера рассмотрим следующий случай:

- Высота дымовой трубы 7 м;
- Массовый расход продуктов сгорания 81 кг/час;
- Плотность продуктов сгорания (при $\vartheta_{cp} = 120$ °С) $w_r = 0,8982$ кг/м³;
- Скорость продуктов сгорания (в первом приближении) $\rho_r = 1,4$ м/с.

Определяем ориентировочную площадь сечения дымового канала:

$$F = \frac{0,225}{1,4 \times 0,8982} = 0,0178 = 1,79, \text{ м}^2$$

Отсюда вычисляем диаметр дымового канала и подбираем ближайший стандартный дымоход: 150 мм.

По новому значению диаметра дымовой трубы определяем площадь дымового канала и уточняем скорость дымовых газов.

$$w_r = \frac{m_g^{\gamma}}{F \times \rho_r} = \frac{0,225}{0,8982 \times 0,01327} = 1,89 \text{ м/с}$$

После этого проверяем, чтобы скорость дымовых газов укладывалась в диапазон 1,5–2,5 м/с.

При слишком высокой скорости дымовых газов увеличивается гидравлическое сопротивление дымохода, а при слишком низкой — активно образуется конденсат водяных паров.

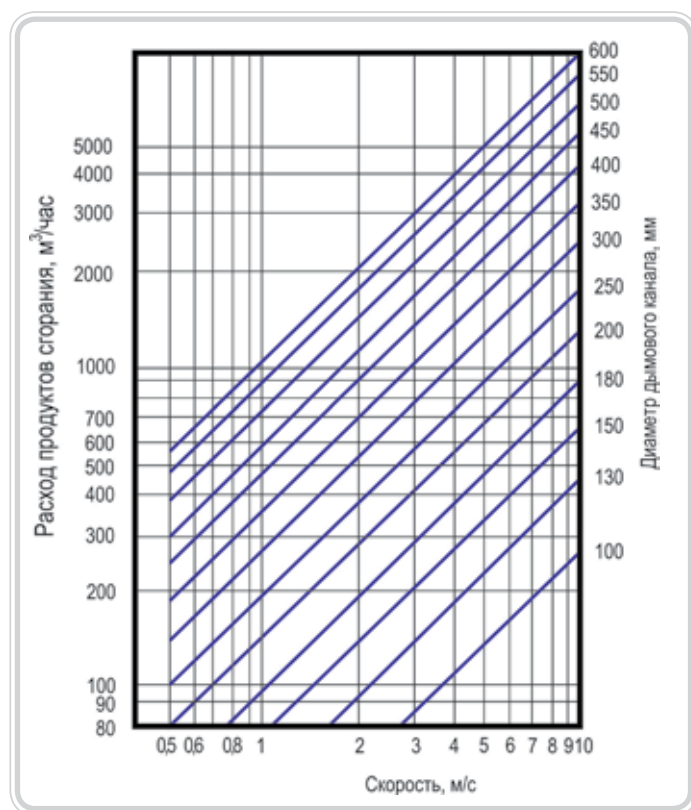
Для примера просчитаем также скорость дымовых газов при нескольких ближайших типоразмерах дымохода:

- Ø 110 mm: $w_r = 2,64$ м/с.
- Ø 130 mm: $w_r = 1,89$ м/с.
- Ø 150 mm: $w_r = 1,42$ м/с.
- Ø 180 mm: $w_r = 0,98$ м/с.

Из полученных значений скоростным условиям удовлетворяют два типоразмера: Ø 130 mm и Ø 150 mm. В принципе, мы можем остановиться на любом из этих значений, однако Ø 150 mm предпочтительней, так как потери напора в этом случае будут меньше.

Для удобства подбора типоразмера дымохода можно использовать график 2.

ГРАФИК 2. ДИАГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ



Для примера:

- Расход продуктов сгорания 468 м³/час; диаметр газохода Ø 300 мм — скорость продуктов сгорания $w_r = 1,9$ м/с;
- Расход продуктов сгорания 90 м³/час; диаметр газохода Ø 150 мм — скорость продуктов сгорания $w_r = 1,4$ м/с;

ПОТЕРИ НАПОРА В ДЫМОХОДЕ.

Сумма сопротивлений трубы:

Сопротивление трения:

$$\sum \Delta h_{\text{тр}} = \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{мс}}, \text{ мм вод.ст}$$

Потери местных сопротивлений:

$$\sum \Delta h_{\text{тр}} = \xi \times \frac{H_{\text{д}}}{d} \times \frac{W_{\text{г}}^2}{2} \times \rho_{\text{г}} \times g, \text{ мм вод.ст}$$

$\lambda = 1,0; 0,9; 0,2-1,4$ — коэффициенты местного сопротивления с выходной скоростью (на выходе из трубы), на входе в дымовую трубу и в поворотах — отводах и тройниках (коэффициент выбирают в зависимости от их конфигураций), соответственно.

Коэффициент сопротивления трения:

для кирпичных труб — 0,05;

для стальных труб — 0,02.

 g — ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с². d — диаметр дымовой трубы, м. $W_{\text{г}}$ — скорость продуктов сгорания в трубе:

$$\Delta h_{\text{мс}} = \sum \xi \times \frac{W_{\text{г}}^2}{2} \times \rho_{\text{г}} \times g, \text{ мм вод.ст}$$

$$W_{\text{г}} = \frac{V_{\text{д}}^{\text{г}}}{0,785 \times d^2}, \text{ м/с}$$

 $V_{\text{д}}^{\text{г}}$ — действительный объем продуктов сгорания:

$$V_{\text{д}}^{\text{г}} = B_{\text{т}} \times (V_{\text{о}}^{\text{г}} + V_{\text{о}}^{\text{в}} \times (\alpha - 1)) \times \frac{(273 + \vartheta_{\text{ср}})}{273}, \text{ м}^3/\text{с}$$

 $B_{\text{т}}$ — расход топлива с учетом теплотворной способности данного топлива; $V_{\text{о}}^{\text{г}}$ — теоретический объем продуктов сгорания для природного газа можно принять 10,9 м³; $V_{\text{о}}^{\text{в}}$ — теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 м³ природного газа 8,5–10 м³; α — коэффициент избытка воздуха, для природного газа 1,05–1,25.

ПРОВЕРКА ТЯГИ ПРОИЗВОДИТСЯ ПО ФОРМУЛЕ:

$$V_{\tau} = \frac{0,86 \times Q}{Q_{\text{н}}^{\rho} \times \eta}, \text{ м}^3/\text{час}$$

$Q_{\text{н}}^{\rho}$ — низшая теплотворная способность (в зависимости от состава топлива), для газа — 8000 ккал/м³;

η — КПД установки из паспортных данных на оборудование (0,9–0,95);

Q — номинальная тепловая мощность котла, кВт;

Перепад полных давлений по газовому тракту:

$$h_c \times \frac{h_{\text{бар}}}{760} - \sum \Delta h_{\text{тр}} \times \frac{\rho_{\text{г}}^{\text{г}}}{\rho_{\text{г}}^{\text{в}}} \times \frac{760}{h_{\text{бар}}} \geq 1,2 \times \Delta H_{\text{н}}$$

$h_{\text{бар}}$ — барометрическое давление, принимается 750 мм вод. ст.;

$\Delta H_{\text{н}}$ — перепад полных давлений газового тракта, мм вод. ст. без учета сопротивления и самотяги трубы;

1,2 — коэффициент запаса по тяге.

В данном случае для проверки тяги перепад полных давлений берется без учета суммарного сопротивления и самотяги трубы.

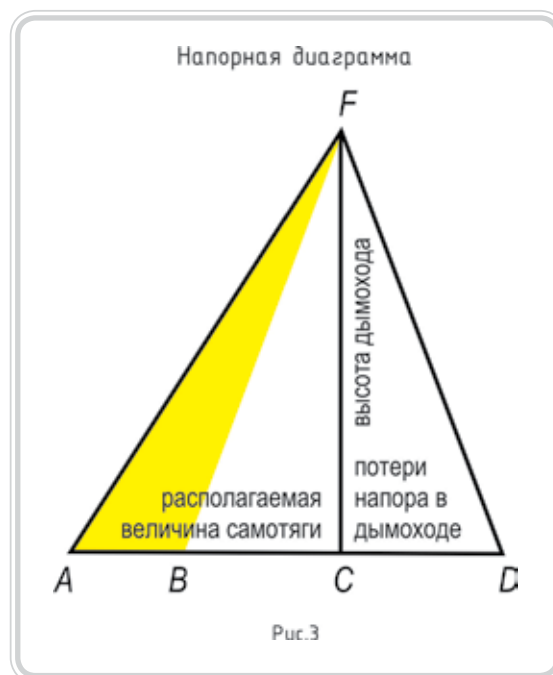
$$\rho H_{\text{н}} = h \times T = 2-5 \text{ мм вод.ст.}$$

где, $h \times T$ — разрежение на выходе из топки, необходимое для предотвращения выбивания газов, обычно принимается 2–5 мм вод. ст.

Для наглядности изобразим процессы, происходящие в дымовом канале на напорной диаграмме (рис. 3).

$$\rho H_{\text{н}} = h \times T + \rho \cdot h \cdot h_c$$

По горизонтальной оси отложим перепады давления и потери напора, а по вертикальной высоту дымохода. Тогда отрезок DB будет обозначать величину самотяги, а линия AF – перепад давлений по высоте дымовой трубы. С другой стороны от оси FC откладываем потери напора в дымоходе. Графически потери давления по длине дымохода будет символизировать отрезок FD. Производим зеркальную проекцию отрезка CD и получаем точку В. Область, затушеванная желтым цветом, показывает разрежение в дымовом канале. Величина естественной тяги уменьшается по высоте дымохода, а потери напора возрастают от устья к основанию дымовой трубы.



Материал использован с сайта <http://www.c-o-k.com.ua>