РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

# КОТЛЫ ПАРОВЫЕ СТАЦИОНАРНЫЕ

## ВЫБОР И РАСЧЕТ СОПЛОВЫХ УСТРОЙСТВ АППАРАТОВ ОБДУВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

**РТМ 24.030.51—75**

**Издание официальное**

gost.e-ecolog.ru

**РАЗРАБОТАН И ВНЕСЕН** Центральным научно-исследовательским и проектно-конструкторским котлотурбинным институтом им. И. И. Ползунова

| | |
|---|---|
| Директор | **Н. М. МАРКОВ** |
| Заведующий базовым отраслевым отделом стандартизации | **К. А. СУПРЯДКИН** |
| Заведующий котельным отделом | **Н. В. ГОЛОВАНОВ** |
| Руководитель работы и исполнитель | **И. Е. ДУБОВСКИЙ** |

**ПОДГОТОВЛЕН К УТВЕРЖДЕНИЮ** Главным управлением атомного машиностроения и котлостроения Министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения

| | |
|---|---|
| Главный инженер | **В. Д. ЗОРИЧЕВ** |

**УТВЕРЖДЕН** Министерством тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения

| | |
|---|---|
| Заместитель министра | **П. О. СИРЫЙ** |

УДК 621.187.322(083.75)

Группа Е02

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

# КОТЛЫ ПАРОВЫЕ СТАЦИОНАРНЫЕ

## ВЫБОР И РАСЧЕТ СОПЛОВЫХ УСТРОЙСТВ АППАРАТОВ ОБДУВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

**РТМ 24.030.51—75**

Указанием Министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения от 28 мая 1975 г. № ПС-002/6876 введен как рекомендуемый.

Настоящий руководящий технический материал (РТМ) содержит методику выбора и расчета сопловых устройств обдувочных аппаратов для котельных агрегатов при применении в качестве обдувающего агента перегретого или насыщенного пара. РТМ дает возможность определять:

— динамические напоры, создаваемые обдувочной струей на поверхности, при различных углах атаки струи;

— дистанцию эффективной обдувки;

— оптимальные схемы и режимы обдувки с точки зрения защиты поверхностей нагрева от пазолового износа;

— оптимальные величины размеров сопл обдувочного аппарата и параметров обдувающего пара.

Настоящий РТМ рекомендуется для применения заводами и проектными организациями при проектировании системы обдувки поверхностей нагрева котлоагрегатов.

### 1. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\alpha$ — угол между осью сопла и обдуваемой поверхностью — угол атаки, град;

$d_0, d_2$ — диаметр сопла Лаваля соответственно в суженном и выходном сечениях, мм;

$R_x$ — расстояние по оси струи от какой-нибудь точки до выходного сечения сопла, мм;

$R_\alpha$ — расстояние от выходного сечения сопла до места пересечения оси струи с обдуваемой поверхностью, мм ;

$R_{пов}$ — расстояние от точки на поверхности до оси обдувочного аппарата, мм: $R_{пов}=R_\alpha \cos\alpha$;

$s$ — расстояние по нормали от оси выходного сечения сопла до обдуваемой поверхности или вылет сопла, мм;

$H_x^{оси}$ — динамический напор на оси струи на расстоянии $R_x$ от выходного сечения сопла, кгс/м$^2$;

$u_x$ — скорость струи на оси, м/с;

$\rho_x$ — плотность струи на оси, кг·с$^2$/м$^4$;

$H_\alpha^{оси}$ — динамический напор на оси струи в месте пересечения оси с поверхностью, кгс/м$^2$;

$H_{пов}$ — динамический напор струи в какой-либо точке поверхности, кгс/м$^2$;

$y$ — расстояние по нормали от точки в поперечном сечении струи до ее оси, мм;

$p_1, p_2$ — давление пара соответственно перед соплом и в выходном сечении сопла, кгс/см$^2$;

$v_1, v_2$ — удельный объем пара соответственно перед соплом и в выходном сечении сопла, м$^3$/кг;

$i_1, i_2$ — энтальпия пара соответственно перед соплом и в выходном сечении сопла, ккал/кг;

$H_2$ — динамический напор в выходном сечении сопла, кгс/м$^2$;

$r$ — радиус необдуваемого пространства вблизи аппарата, мм;

$p_{окр}$ — давление окружающей среды (в газоходе), кгс/м$^2$;

$a$ — коэффициент структуры струи (безразмерный).

### 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБДУВОЧНЫХ АППАРАТОВ И ПАРАМЕТРЫ ПАРА ДЛЯ ОБДУВКИ

2.1. Обдувочные аппараты применяются для очистки от шлакозоловых отложений радиационных, ширмовых и конвективных поверхностей нагрева, а также регенеративных вращающихся воздухоподогревателей.

Эффект обдувки основан на динамическом и частично термическом воздействии на шлако-золовые отложения струи, вытекающей со сверхзвуковой скоростью из сопла обдувочного аппарата.

В качестве обдувочного агента используется перегретый пар давлением (перед соплами) 13—25 кгс/см$^2$.

В обдувочных аппаратах применяются укороченные сопла Лаваля; угол раскрытия сопла (на

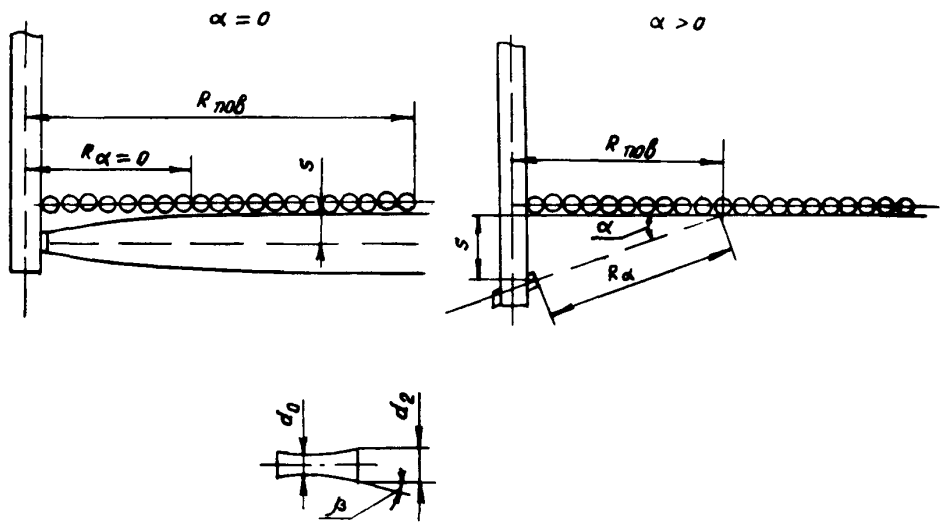
сторону) $\beta=6{,}5\div7{,}5°$. Угол атаки $\alpha$ (черт. 1) изменяется в пределах 0—15°.

2.2. Для очистки радиационных поверхностей нагрева топки служит обдувочный аппарат типа ОПР-5-58 с вращательным движением сопловой головки (частота вращения $n=37{,}5$ об/мин).

гается за счет регулирующего клапана аппарата. Благодаря повышению давления пара по мере выдвижения сопловой головки обеспечивается приблизительно одинаковый динамический напор на обдуваемой поверхности экрана.

2.3. Глубоковыдвижные аппараты типа ОГ

**Схема обдувки поверхности нагрева и схема сопла**




Черт. 1

Число оборотов сопловой головки на позиции обдувки устанавливается по реле времени и может изменяться от 5 до 20 с в зависимости от рода сжигаемого топлива (свойств отложений).

Необходимое давление перед обдувочными аппаратами при обдувке перегретым паром обеспечивается установкой на линии отбора пара из котла регулирующего клапана, редуцирующего давление до заданного. Применение насыщенного пара по условиям эрозии труб поверхностей нагрева нежелательно.

С 1971 г. завод «Ильмарине» выпускает аппараты типа ОМ-0,35 (взамен типа ОПР-5-58). Время обдувки аппарата ОМ-0,35 (черт. 2), устанавливаемое по реле времени, может изменяться в тех же пределах, что в аппарате ОПР-5-58, частота вращения обдувочной трубы $n=16$ об/мин [1,3]. Аппараты типов ОПР-5-58 и ОМ-0,35 снабжаются двумя соплами диаметром $d_0=20$ мм ($d_2=25{,}8$ мм), угол атаки струи 0 и 4°. Давление пара перед соплами $p_1=18$ кгс/см², температура $t_1=400\div450°$ С. Вылет сопла в топку (от оси сопла до образующих экранных труб) $S=70$ мм. Для очистки топочных экранов при сжигании высокозольных топлив типа эстонских сланцев завод «Ильмарине» выпускает обдувочные аппараты типа ОГРЭ (черт. 3), характеризующиеся вращательно-поступательным движением сопловой головки в топку. Глубина выдвижения 600 мм, частота вращения сопловой трубы $n=16$ об/мин. Диаметр сопла $d_0=20$ мм (2 шт.). Оси сопл направлены в сторону экрана. Угол атаки $\alpha=15°$. В процессе выдвижения сопловой головки в топку давление пара перед соплами повышается от 3,0 до номинального $p_1=25$ кгс/см², что достигается за счет регулирующего клапана аппарата.

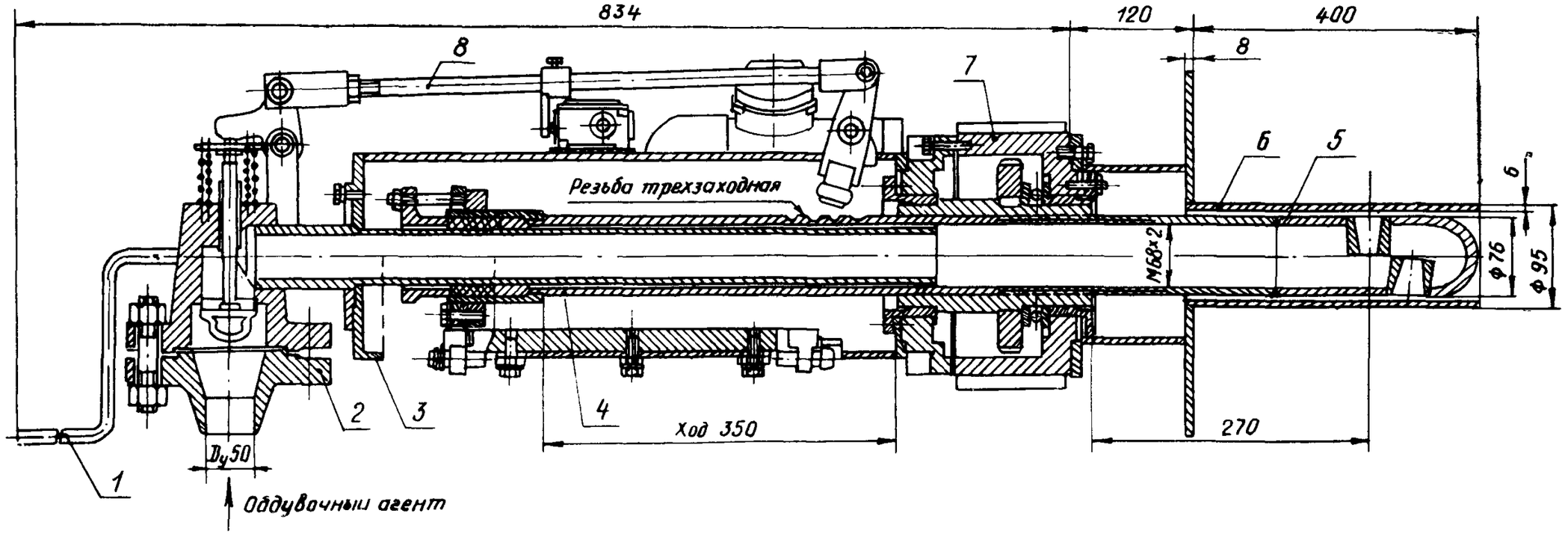
(черт. 4) предназначены для очистки ширмовых и конвективных перегревателей с коридорным расположением труб. Аппарат типа ОГ характеризуется вращательно-поступательным движением сопловой трубы, частота вращения $n=16$ об/мин, скорость поступательного движения $w=1{,}5$ м/мин. Сопловая головка снабжена двумя соплами с $d_0=16$ мм ($d_2=22$ мм); угол атаки струи $\alpha=0$. Давление пара перед соплами $p_1=13\div15$ кгс/см². Обдувка поверхности аппаратами ОГ производится при прямом и обратном ходе сопловой трубы.

При сжигании многозольных топлив (типа эстонского сланца) для очистки ширмовых перегревателей применяются обдувочные аппараты типа ОГП с вращательно-поступательным движением сопловой трубы. В отличие от аппарата ОГ в аппарате ОГП сопла диаметром $d_0=12$ мм направлены на поверхность ширм (одно сопло — вперед, одно — назад) при угле атаки $\alpha=12°$.

При приближении сопловой головки к ширме на расстоянии 200—250 мм давление пара перед соплами снижается («отсечка» пара) до $p_1=3\div4$ кгс/см², для этой цели аппараты снабжены поршневым и импульсным клапанами. Дистанция отсечки устанавливается с помощью кулачков на балке аппарата. После прохождения сопловой головкой плоскости ширмы восстанавливается первоначальное давление пара $p_1$ (на расстоянии 200—250 мм от ширмы).

2.4. Для очистки конвективных пучков с коридорным расположением труб в зоне температур газов не выше 600° С применяется невыдвижной вращающийся аппарат типа ОН (черт. 5).

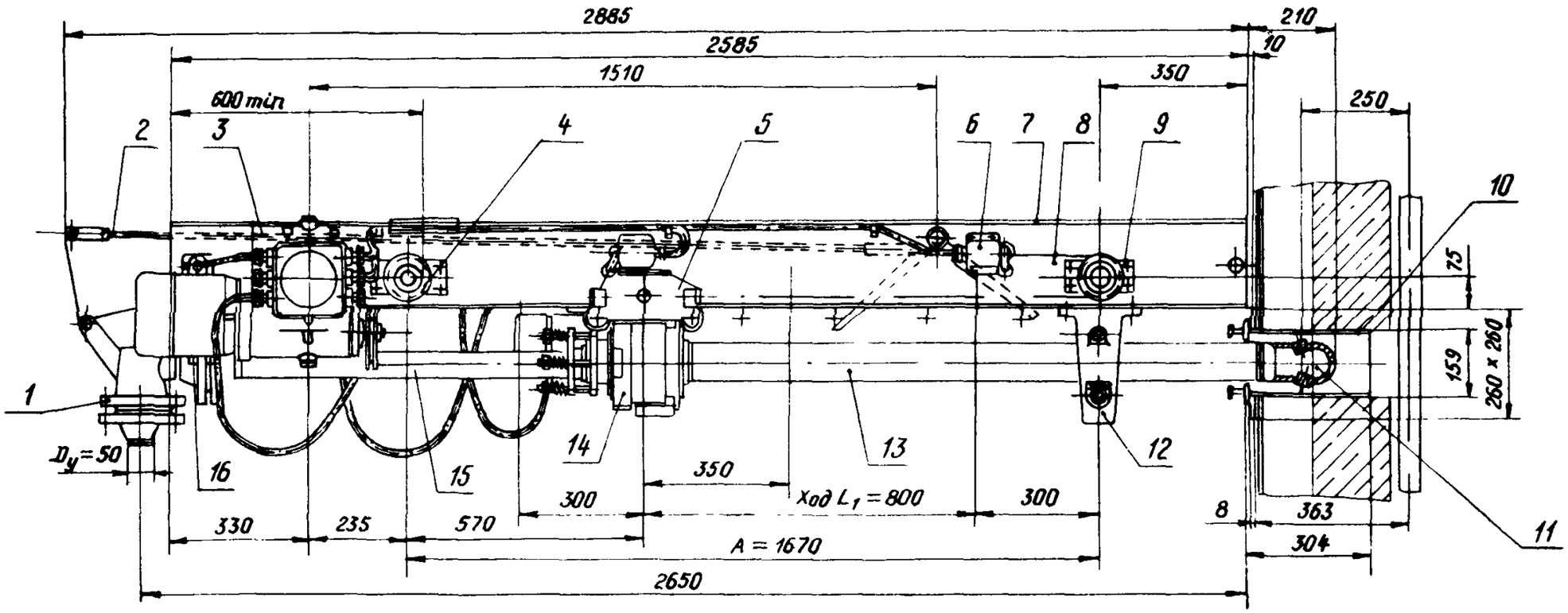
**Аппарат типа ОМ-0,35**




*1* — рукоятка; *2* — клапан; *3* — корпус; *4* — шпиндель; *5* — сопловая головка; *6* — втулка закладная; *7* — редуктор; *8* — рычажный механизм

Черт. 2

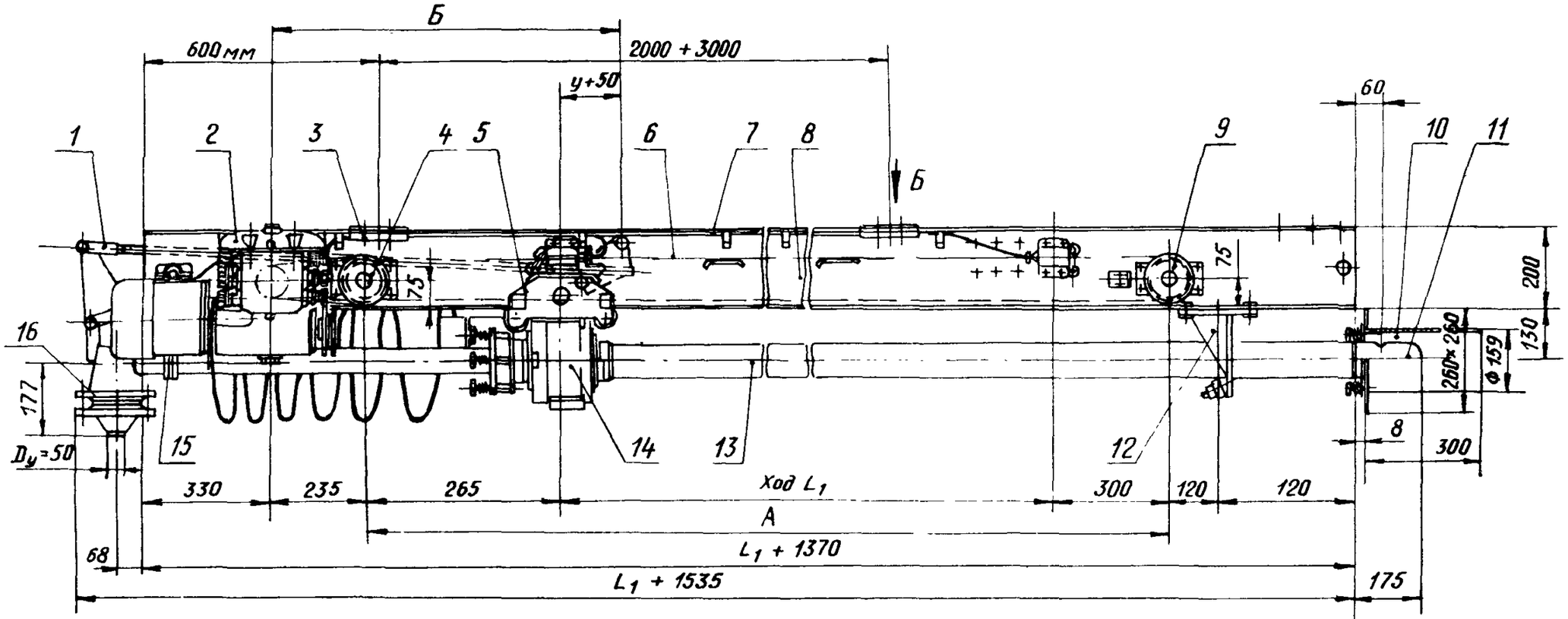
**Аппарат обдувки ОГРЭ**




*1* — узел клапана; *2* — рычажный механизм; *3* — редуктор; *4* — промежуточная передача; *5* — каретка, *6* — проводка кабелей; *7* — балка; *8* — цепь приводная; *9* — узел звездочки, *10* — закладная втулка; *11* — сопловая головка; *12* — подшипник передний; *13* — обдувочная труба; *14* — редуктор; *15* — труба подводящая с фланцем; *16* — кронштейн

Черт. 3

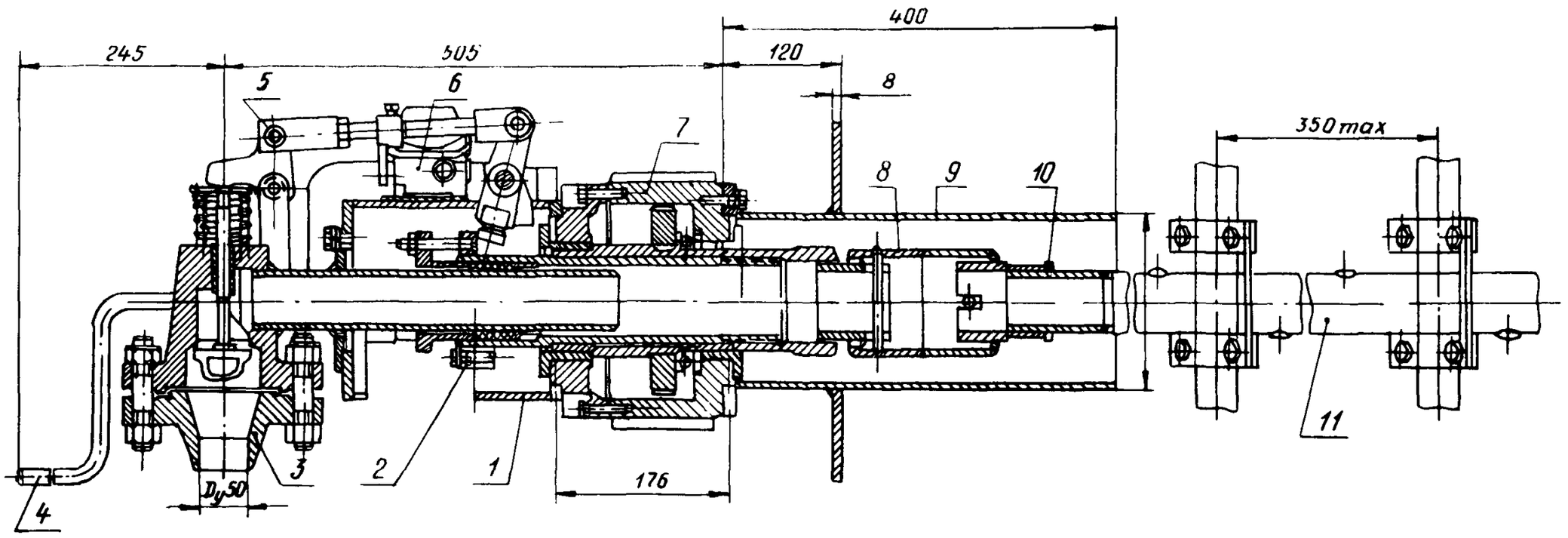
## Аппарат обдувки глубоковыдвижной типа ОГ




*1* — рычажный механизм; *2* — редуктор; *3* — крепление; *4* — промежуточная передача *5* — каретка; *6* — приводная цепь; *7* — проводка кабеля, *8* — балка; *9* — узел звездочки; *10* — закладная втулка; *11* — сопловая головка; *12* — подшипник передний; *13* — обдувочная труба; *14* — редуктор; *15* — кронштейн; *16* — узел клапана

Черт. 4

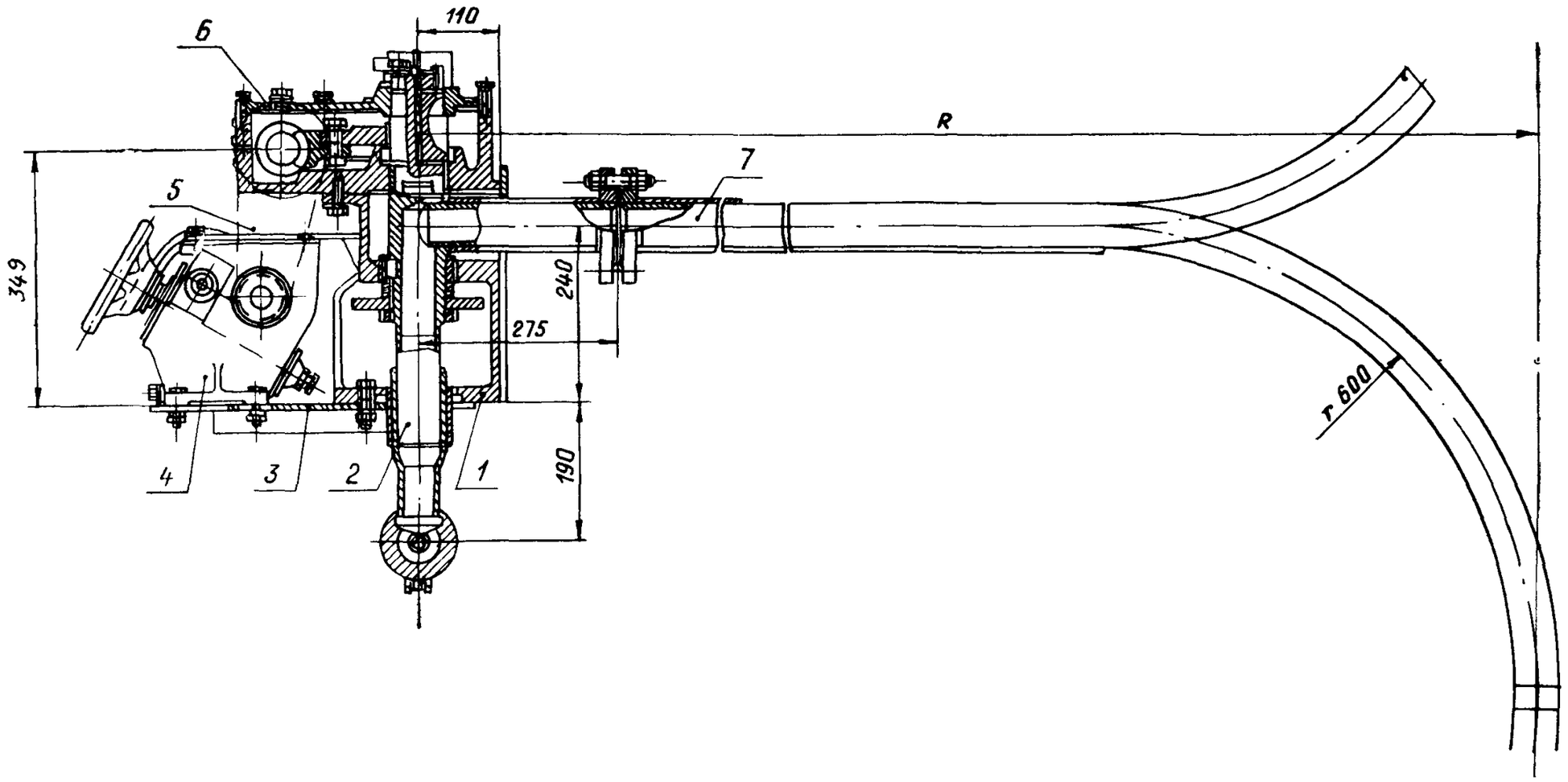
**Аппарат обдувки типа ОН**




*1* — корпус; *2* — шпиндель с сальником; *3* — узел клапана, *4* — рукоятка; *5* — механизм рычажный; *6* — конечный выключатель; *7* — редуктор; *8* — муфта шарнирная (для обдувочной трубы с $L$=4000 мм); *9* — втулка закладная; *10* — гайка; *11* — обдувочная труба

Черт. 5

## Аппарат обдувки типа ОП




*1* — корпус; *2* — труба осевая; *3* — плита; *4* — привод; *5* — цепная передача; *6* — редуктор; *7* — обдувочная труба

Черт. 6

Частота вращения обдувочной трубы $n=16$ об/мин. Обдувочная труба снабжена укороченными соплами Лаваля диаметром $d_0=6$ мм, число сопл на трубе — до 50. Давление пара перед аппаратом устанавливается в пределах 13—20 кгс/см².

2.5. Для очистки регенеративных воздухоподогревателей применяется обдувочный аппарат типа ОП (черт. 6). Обдувочная труба качающегося типа снабжается сопловой головкой, диаметр сопла $d_0=18$ мм, $d_2=31$ мм.

Давление перегретого пара перед аппаратом $p_1=20$ кгс/см², его температура 400—425° С. Сопло устанавливается на расстоянии 200 мм от поверхности набивки, скорость перемещения сопла 0,0277 рад/мин (10 град/мин).

2.6. Для обдувки поверхности нагрева может также применяться сжатый воздух давлением $p_1=15\div25$ кгс/см² перед обдувочным аппаратом. Однако сжатый воздух для целей обдувки не нашел пока применения в СССР в связи с тем, что промышленность не выпускает воздушных компрессоров большой производительности, необходимых для обдувки.

## 3. ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАПОРОВ ОБДУВАЮЩИХ СТРУЙ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА

3.1. При истечении струи из сопла с сверхзвуковыми скоростями расширение струи и падение скорости вдоль ее оси являются менее резкими, чем в случае расширения дозвуковой струи.

При истечении «холодной» неизотермической струи в более «горячую» среду скорости на ее оси $u_x$ получаются выше скорости на оси изотермической струи, плотность на оси $\rho_x$ ниже плотности струи в начальном сечении, а динамический напор на оси $\frac{\rho_x u_x^2}{2}$ практически одинаков для изотермической и неизотермической струи.

По опытным данным ЦКТИ, динамический напор на оси свободной неизотермической струи, вытекающей из сопла обдувочного аппарата с сверхзвуковой скоростью, в зависимости от динамического напора в устье сопла $H_2$ и относительного расстояния от точки до выходного сечения сопла $\frac{R_x}{d_2}$ равен [2]

$$H_x^{\text{оси}}=\frac{0{,}23\,H_2}{\left(\frac{aR_x}{d_2}\right)^{2{,}4}}\ \text{кгс/м}^2, \qquad (1)$$

где $a$ — коэффициент структуры струи, характеризующий степень ее расширения за соплом. При давлении в выходном сечении сопла ниже окружающего $p_2=(0{,}5\div1{,}0)p_{\text{окр}}$ коэффициент структуры изменяется соответственно в пределах 0,050—0,046. Выражение (1) проверено опытными данными при относительных расстояниях на оси струи $\frac{R}{d_2}=25\div120$. При $p_2\geqslant p_{\text{окр}}$, $a\approx0{,}046$.

3.2. По опытным данным ЦКТИ, при направлении струи на поверхность с положительным углом атаки в пределах 8—15° динамический напор в месте пересечения оси струи с поверхностью определяется по формуле

$$H_\alpha^{\text{оси}}=\frac{0{,}23\,H_2}{\left(\frac{aR_\alpha}{d_2}\right)^{2{,}2}}\ \text{кгс/м}^2. \qquad (2)$$

При выходе струи из сопла вблизи поверхности коэффициент структуры струи несколько выше, чем для свободной струи, и равен $a=0{,}049\div0{,}050$ при $p_2\geqslant p_{\text{окр}}$; $a=0{,}054\div0{,}049$ соответственно при $p_2=(0{,}5\div1{,}0)p_{\text{окр}}$.

Развитие струи вблизи поверхности сопровождается небольшим искривлением ее оси (приближением струи к поверхности).

Расстояние от устья сопла до места пересечения струи с поверхностью $R_\alpha$ связано с величиной вылета сопла от поверхности $s$ следующей зависимостью:

$$R_\alpha=\frac{s}{\sin(\alpha+\Delta)}\ \text{мм}, \qquad (3)$$

где $\Delta$ — поправка на искривление оси струи, равная 1—2° при углах атаки соответственно 15—8°.

3.3. При обдувке поверхности с помощью сопл, расположенных параллельно поверхности (при угле атаки $\alpha=0$) и на близком от нее расстоянии ($s=50\div200$ мм), динамические напоры в ее поперечных сечениях убывают по экспоненциальному закону и зависят от обобщенного параметра $\frac{y}{aR_\alpha}$. При касании струей поверхности расстояние $y=s$. При обдувке поверхности с углом атаки $\alpha=0$ максимальный динамический напор на поверхности достигается на расстоянии $R_{\alpha=0}$ от устья сопла, зависящем от вылета сопла,

$$R_{\alpha=0}\approx41\,s^{0{,}75}\left(\frac{d_0}{10}\right)^{0{,}2}\ \text{мм}. \qquad (4)$$

Величина максимального динамического напора струи на поверхности при $\alpha=0$ определяется по формуле

$$H_{\alpha=0}^{\max}=H_\alpha^{\text{оси}}\psi\ \text{кгс/м}^2, \qquad (5)$$

где

$$\psi=e^{-0{,}25\left(\frac{s}{aR_\alpha}\right)^{2{,}2}}. \qquad (6)$$

Коэффициент структуры струи в формуле (6) принимается $a\approx0{,}050$ и величина $H_\alpha^{\text{оси}}$ определяется по формуле (2). Для графического определения коэффициента $\psi$ в зависимости от параметра $\frac{s}{aR_\alpha}$ служит черт. 7.

3.4. Динамический напор в выходном сечении сопла Лаваля

$$H_2=\frac{c_2^2}{2gv_2}\ \text{кгс/м}^2. \qquad (7)$$

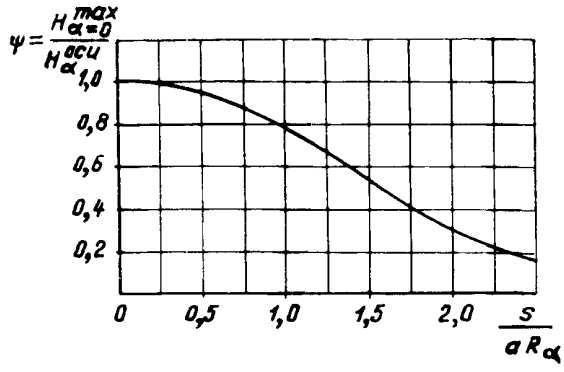
Скорость пара на выходе из сопла

$$c_2=91{,}5\sqrt{i_1-i_2}\ \text{м/с}. \qquad (8)$$

При адиабатическом истечении параметры пара $i_1$, $i_2$ и $v_2$ определяются по $I-S$ диаграмме, для

чего необходимо знать давление в выходном сечении сопла $p_2$ [4].

**Зависимость отношения $\frac{H_{\alpha=0}^{max}}{H_{\alpha}^{оси}}$ от параметра $\frac{s}{aR_{\alpha}}$**




Черт. 7

Давление $p_2$ находится из следующего уравнения истечения:

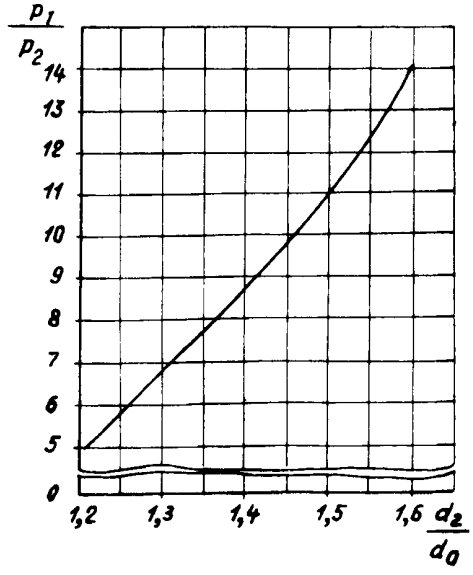
$$\left(\frac{d_2}{d_0}\right)^2 = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{(k-1)}{(k+1)\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}}. \quad (9)$$

При показателе политропы для перегретого пара $k=1{,}3$ имеем

$$\left(\frac{d_0}{d_2}\right)^4 = 19{,}5\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1{,}54} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1{,}77}\right]. \quad (10)$$

Полученная зависимость изображена на черт. 8.

**Зависимость отношения давлений в сопле $\frac{p_1}{p_2}$ от параметра $\frac{d_2}{d_0}$**




Черт. 8

С помощью последней при заданном отношении $\frac{d_2}{d_0}$ находят величины $\frac{p_1}{p_2}$ и $p_2$.

3.5. После пересечения струи с поверхностью динамический напор струи на поверхности убывает по закону экспоненты. Динамический напор в любой точке поверхности $H_{пов}$ связан с величиной максимального динамического напора на поверхности $H_{\alpha}^{max}$ (или $H_{\alpha}^{оси}$) следующим выражением:

при углах атаки, близких нулю (0—3°):

$$R_{пов} = R_{\sigma=0}\left[1 + \frac{1}{1+2\operatorname{tg}\alpha}\left(\frac{d_0}{10}\right)^{0,5}\left(\lg\frac{H_{\alpha=0}^{max}}{H_{пов}}\right)^{0,75}\right] \text{ мм}, \quad (11)$$

при значительных углах атаки (8—15°)

$$R_{пов} = R_{\alpha}\cos\alpha\left[1 + 0{,}8\left(\frac{d_0}{10}\right)^{0,1}\left(\lg\frac{H_{\alpha}^{оси}}{H_{пов}}\right)^{0,67}\right] \text{ мм}. \quad (12)$$

Величина $R_{пов}$ при динамическом напоре на поверхности $H_{пов}=300$ кгс/м², условно называется дистанцией эффективной обдувки и обозначается $R_{эф}$. При $R_{пов}>R_{эф}$ и $H_{пов}<300$ кгс/м² эффективность обдувки обычно недостаточная (при наличии рыхлых отложений допускается $H_{пов}<300$ кгс/м²).

3.6. Радиус необдуваемого пространства вблизи обдувочного аппарата (ОПР-5-58 и ОМ-0,35)

$$r \approx R_{\alpha}\cos\alpha - 400 \text{ мм}. \quad (13)$$

3.7. Изложенный метод расчета позволяет производить выбор обдувочных аппаратов для поверхностей нагрева котельных агрегатов. Исходя из принятых на практике давлений пара перед соплами $p_1$ и размеров сопл, вычисляют динамические напоры паровой струи в выходном сечении сопла и на поверхности нагрева в зависимости от относительного расстояния $R_{\alpha}/d_2$.

Исходя из минимальной величины эффективного динамического напора обдувочной струи на поверхности нагрева $H_{пов}\approx 300$ кгс/м² (для большинства топлив) определяют дистанцию эффективной обдувки по формуле (11) или (12) и количество обдувочных аппаратов для очищаемой поверхности.

## 4. РАСЧЕТЫ ОБДУВОЧНЫХ АППАРАТОВ

4.1. Определение максимального динамического напора струи на поверхности экрана и дистанция эффективной обдувки обдувочных аппаратов типа ОПР-5-58 и ОМ-0,35 приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

| Показатели | Формула расчета | Результат |
|---|---|---|
| Диаметр сопла, мм: | | |
| $d_0$ | Задано | 20 |
| $d_2$ | » | 25,8 |
| Угол атаки струи $\alpha$, град | » | 0 |
| Вылет сопла $s$, мм | » | 70 |
| Давление пара перед соплом $p_1$, кгс/см² | » | 18 |
| Температура пара $t$, °С | » | 400 |
| Энтальпия пара $i_1$, ккал/кг | » | 777 |
| Давление пара в выходном сечении сопла $p_2$, кгс/см² | $\frac{p_1}{6{,}8}$ (по черт. 8) | 2,65 |

*Продолжение табл. 1*

| Показатели | Формула расчета | Результат |
|---|---|---|
| Удельный объем пара там же $v_2$, м³/кг | По *I—S*-диаграмме | 0,74 |
| Энтальпия пара там же $i_2$, ккал/кг | По *I—S*-диаграмме | 667 |
| Скорость пара там же $c_2$, м/с | $91{,}5\sqrt{i_1 - i_2}$ | 960 |
| Динамический напор струи в выходном сечении сопла $H_2$, кгс/м² | $\frac{c_2^2}{19{,}6v_2}$ | 63 600 |
| Расстояние от оси аппарата до места максимального динамического напора на поверхности экрана $R_{\alpha=0}$, мм | $41 \cdot s^{0,75}\left(\frac{d_0}{10}\right)^{0,2}$ | 1200 |
| Обобщенный параметр | $\frac{s}{aR}$ | 1,17 |
| Коэффициент $\psi$ | Черт. 7 | 0,65 |
| Максимальный динамический напор на поверхности экрана $H_{\alpha=0}^{max}$ кгс/м² | $\frac{0{,}23H_2\psi}{\left(\frac{aR}{d_2}\right)^{2,2}}$ | 1500 |
| Дистанция эффективной обдувки ($H_{пов}$=300 кгс/м²) $R_{эф}$, мм | $1200\left[1 + \left(\frac{d_0}{10}\right)^{0,5} \times \left(\lg\frac{H_{max}}{H_{пов}}\right)^{0,75}\right]$ | 2500 |
| Радиус необдуваемого пространства $r$, мм | $R_\alpha \cos\alpha - 400$ | 800 |

4.2. Определение вылета сопла в зависимости от давления пара перед соплом $p_1$, при котором обеспечивается заданная постоянная величина динамического напора струи на поверхности экрана, для обдувочного аппарата типа ОГРЭ приведено в табл. 2.

*Таблица 2*

| Показатели | Формула расчета | $p_1$, кгс/см² | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 3 | 15 | 25 |
| Температура пара до сопла $t_1$, °С | Задано | 300 | 350 | 400 |
| Угол атаки струи $\alpha$, град | » | 15 | 15 | 15 |
| Диаметр сопла, мм: | | | | |
| $d_0$ | » | 20 | 20 | 20 |
| $d_2$ | » | 25,8 | 25,8 | 25,8 |
| Динамический напор струи на поверхности экрана $H_{пов}$, кгс/м² | Задаемся | 800 | 800 | 800 |
| Давление пара в выходном сечении сопла $p_2$, кгс/см² | По черт. 8 | 0,445 | 2,22 | 3,7 |
| Энтальпия пара, ккал/кг: | | | | |
| перед соплом $i_1$ | По *I—S*-диаграмме | 733 | 752 | 775 |
| за соплом $i_2$ | | 636 | 648 | 664 |
| Удельный объем пара $v_2$ при $p_2$, м³/кг | То же | 3,8 | 0,8 | 0,53 |
| Скорость пара в выходном сечении сопла $c_2$, м/с | $91{,}5\sqrt{i_1 - i_2}$ | 900 | 925 | 965 |

*Продолжение табл. 2*

| Показатели | Формула расчета | $p_1$, кгс/см² | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 3 | 15 | 25 |
| Динамический напор в выходном сечении сопла $H_2$, кгс/м² | $\frac{c_2^2}{2gv_2}$ | 10 900 | 54 500 | 89 500 |
| Расстояние по оси струи от выходного сечения сопла до поверхности экрана ($a$=0,05) $R_\alpha$, мм | $\left(0{,}23 \times \frac{H_2}{H_\alpha^{оси}}\right)^{0,455} \times \times \frac{d_2}{a}$ | 800 | 1800 | 2260 |
| Вылет сопла $s$, мм | $R_\alpha \sin\alpha$ | 205 | 465 | 585 |

4.3. Определение динамического напора струи на поверхности нагрева для аппаратов типа ОГ приведено в табл. 3, а для типа ОГП в табл. 4, (для очистки ширм и конвективных пучков).

*Таблица 3*

| Показатели | Формула расчета | Результат | |
|---|---|---|---|
| | | Вариант I | Вариант II |
| Диаметр сопла, мм | | | |
| $d_0$ | Задано | 16 | 12 |
| $d_2$ | » | 22 | 16 |
| Вылет сопла от плоскости труб $s$, мм | » | 30 | 30 |
| Давление пара перед соплом $p_1$, кгс/см² | » | 14 | 14 |
| Температура пара $t_1$ там же, °С | » | 400 | 400 |
| Энтальпия пара $i$ там же, ккал/кг | » | 778 | 778 |
| Давление пара в выходном сечении сопла $p_2$, кгс/см² | По черт. 8 | 1,75 | 1,90 |
| Удельный объем пара $v_2$ там же, м³/кг | По *I—S*-диаграмме | 1,1 | 1,0 |
| Энтальпия пара $i_2$ там же, м/с | » | 657 | 661 |
| Скорость пара $c_2$ там же, м/с | $91{,}5\sqrt{i_1 - i_2}$ | 1000 | 990 |
| Динамический напор в выходном сечении сопла $H_2$, кгс/м² | $\frac{c_2^2}{19{,}6v_2}$ | 46 500 | 50 000 |
| Расстояние от оси аппарата $R_{\alpha=0}$ до места, где достигается $H_{\alpha=0}^{max}$, мм | $41s^{0,75}\left(\frac{d_0}{10}\right)^{0,2}$ | 580 | 550 |
| Обобщенный параметр | $\frac{S}{aR_\alpha}$ | 1,03 | 1,09 |
| Коэффициент $\psi$ | По черт. 7 | 0,78 | 0,75 |
| Максимальный динамический напор на поверхности труб $H_{\alpha=0}^{max}$, кгс/м² | $\frac{0{,}23H_2\psi}{\left(\frac{aR_{\alpha=0}}{d_2}\right)^{2,2}}$ | 4550 | 2600 |
| Дистанция эффективной обдувки $R_{эф}$ до места, где $H_{пов}$ = 300 кгс/м², мм | Формула (11) | 1400 | 1120 |

*Таблица 4*

| Показатели | Формула расчета | Результат |
|---|---|---|
| Диаметр сопла, мм: | | |
| $d_0$ | Задано | 10 |
| $d_2$ | » | 14 |
| Угол атаки струи $\alpha$, град | » | 12 |
| Вылет сопла $s$, мм | » | 30 |
| Давление пара после отсечки $p_1$, кгс/см$^2$ | » | 4,0 |
| Температура пара $t_1$, °С | » | 400 |
| Энтальпия пара $i_1$, ккал/кг | По $I$—$S$-диаграмме | 782 |
| Давление пара в выходном сечении сопла $p_2$, кгс/см$^2$ | $p_1/8{,}8$ | 0,46 |
| Удельный объем пара $v_2$ там же, м$^3$/кг | По $I$—$S$-диаграмме | 4,2 |
| Энтальпия пара $i_2$, ккал/кг | » | 655 |
| Скорость пара в выходном сечении сопла $c_2$, м/с | $91{,}5\sqrt{i_1 - i_2}$ | 1030 |
| Динамический напор струи $H_2$ там же, кгс/м$^2$ | $\frac{c_2^2}{19{,}6v_2}$ | 12 900 |
| Расстояние от оси аппарата до места, где развивается $H^{max}_{\alpha=0}$, $R_{\alpha=0}$, мм * | $41 s^{0,75}\left(\frac{d_0}{10}\right)^{0,2}$ | 520 |
| Обобщенный параметр | $\frac{s}{aR_{\alpha=0}}$ | 1,07 |
| Коэффициент $\psi$ | По черт. 7 | 0,76 |
| Максимальный динамический напор на поверхности ширмы $H^{max}_{\alpha=0}$ | $\frac{0{,}23H_2\psi}{\left(\frac{aR_{\alpha=0}}{d_2}\right)^{2,2}}$ | 500 |
| Дистанция эффективной обдувки (до места, где $H_{пов}$ = =300 кгс/м$^2$) $R_{эф}$, мм | Формула (11) | 700 |

* Ввиду малого расстояния $R_\alpha$ от оси аппарата влиянием угла атаки (12°) пренебрегаем.

4.4. Аппарат вращающегося типа ОН применяется для очистки поверхности нагрева, где температура газов не превышает 600° С. Шаг сопл на обдувочной трубе равен шагу труб поверхности нагрева по ширине котла.

Большое число сопл на обдувочной трубе и тепловые расширения труб поверхности нагрева делают вероятным попадание струй из сопл непосредственно на поверхность первого ряда труб пучка.

Динамический напор струи на поверхности пучка определяется применительно к случаю развития свободной неизотермической струи.

Расстояние от сопла до первого ряда труб пучка принимаем $R_x$=350 мм (ширина коридора для установки обдувочного аппарата приблизительно равна 700 мм). Результаты расчетов (табл. 5) показывают, что динамический напор на поверхности первого ряда пучка является весьма высоким (2350 кгс/м$^2$); это обусловлено малым относительным расстоянием от сопла до поверхности $\frac{R_x}{d_2}$=39.

*Таблица 5*

| Показатели | Формула расчета | Результат |
|---|---|---|
| Диаметр сопла, мм: | | |
| $d_0$ | Задано | 6 |
| $d_2$ | » | 9 |
| Давление пара перед соплом $p_1$, кгс/см$^2$ | » | 14 |
| Температура пара $t_1$, °С | » | 400 |
| Энтальпия пара $i_1$, ккал/кг | По $I$—$S$-диаграмме | 778 |
| Давление пара в выходном сечении сопла $p_2$, кгс/см$^2$ | $\frac{p_1}{11}$ (по черт. 8) | 1,27 |
| Удельный объем пара $v_2$, м$^3$/кг | По $I$—$S$-диаграмме | 1,4 |
| Энтальпия пара $i$, ккал/кг | » | 645 |
| Скорость пара в выходном сечении сопла $c_2$, м/с | $91{,}5\sqrt{i_1 - i_2}$ | 1060 |
| Динамический напор в выходном сечении сопла $H_2$, кгс/м$^2$ | $\frac{c_2^2}{19{,}6v_2}$ | 41 000 |
| Динамический напор на оси струи $H_x^{оси}$ при $R_x$=350 мм, кгс/м$^2$ | $\frac{0{,}23H_2}{\left(\frac{0{,}046R_x}{d_2}\right)^{2,4}}$ | 2350 |

4.5. Аппарат типа ОП применяется для очистки вращающегося регенеративного воздухоподогревателя. В табл. 6 определяется динамический напор

*Таблица 6*

| Показатели | Формула расчета | Результат | |
|---|---|---|---|
| | | Вариант I | Вариант II |
| Диаметр сопла, мм: | | | |
| $d_0$ | Задано | 18 | 18 |
| $d_2$ | » | 31 | 24 |
| Давление пара перед соплом $p_1$, кгс/см$^2$ | » | 18 | 18 |
| Температура пара $t_1$, °С | » | 400 | 400 |
| Энтальпия пара $i_1$, ккал/кг | По $I$—$S$-диаграмме | 776 | 776 |
| Давление пара в выходном сечении сопла $p_2$, кгс/см$^2$ | По черт. 8 | 1,0 | 2,4 |
| Удельный объем пара $v_2$, м$^3$/кг | По $I$—$S$-диаграмме | 1,60 | 0,79 |
| Энтальпия пара $i_2$, ккал/кг | » | 623 | 660 |
| Скорость пара в выходном сечении сопла $c_2$, м/с | $91{,}5\sqrt{i_1 - i_2}$ | 1130 | 985 |
| Динамический напор в выходном сечении сопла $H_2$, кгс/м$^2$ | $\frac{c_2^2}{2gv_2}$ | $41 \cdot 10^3$ | $62{,}5 \cdot 10^3$ |
| Динамический напор на оси струи $H_x^{оси}$ при $R_x$=600 мм, кгс/м$^2$ | $\frac{0{,}23H_2}{\left(\frac{0{,}046R_x}{d_2}\right)^{2,4}}$ | 12 500 | 10 300 |
| Температура пара на выходе из сопла $t_2$, °С | По $I$—$S$-диаграмме | 100 | 150 |
| Влажность пара $x$, % | | 3 | 0 |
| Расход пара через сопло $G$, т/ч | $3{,}6\frac{f_2 c_2}{v_2}$ | 2,0 | 2,0 |

для свободной неизотермической струи пара с начальным давлением $p_1=18$ кгс/см² на относительном расстоянии от сопла $\frac{R_x}{d_2}\approx 20$ (при меньших значениях $\frac{R_x}{d_2}$ отсутствуют опытные данные) при диаметре в узком сечении сопла $d_0=18$ мм и двух значениях диаметра выходного сечения сопла $d_2$.

Расчеты показывают, что при применении сопла полного расширения ($d_0=18$ мм, $d_2=31$ мм) при начальной температуре пара $t_1=400°$ С пар на выходе из сопла получается влажным (влажность 3%). При применении укороченного сопла Лаваля ($d_0=18$ мм, $d_2=24$ мм) на выходе из сопла получается перегретый пар $t_п=150°$ С и, следовательно, влага в набивку регенеративного воздухоподогревателя не поступает.

## 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ АППАРАТОВ ОБДУВКИ

5.1. Настоящие рекомендации основываются на опыте проектирования и эксплуатации обдувочных аппаратов, выпускаемых заводом «Ильмарине», и результатах исследований работы обдувочных аппаратов, проводившихся ЦКТИ на котлах и стендах, с учетом опыта эксплуатации котлоагрегатов на шлакующих топливах.

### 5.2. Обдувочные аппараты для очистки топочных экранов

5.2.1. Согласно расчетам (раздел 4) при обдувке топочных экранов обдувочными аппаратами типа ОПР-5-58 или ОМ-0,35 с соплами $d_0=20$ мм максимальный динамический напор струи на поверхности экрана получается на расстоянии $R_{\alpha=0}\approx 1200$ мм от оси аппарата и составляет $H^{max}_{\alpha=0}=1500$ кгс/м². При размещении обдувочных аппаратов радиус эффективной обдувки при $d_0=20$ мм и $p_1=18$ кгс/см² принимается равным $R_{пов}=2500$ мм; на указанном расстоянии от оси аппарата динамический напор на поверхности снижается до $H_{пов}=300$ кгс/м².

5.2.2. Эффективность очистки поверхности от отложений зависит от динамического напора струи на поверхности и времени действия обдувки, т. е. от величины импульса $H_{пов}\tau_{вр}$, где $\tau_{вр}$ — время работы вращающегося аппарата, ч. Наряду с этим эффективность обдувки зависит от свойств и количества отложений на поверхности нагрева.

При образовании на трубах плотных кальциевых отложений (например, при сжигании эстонских сланцев) эффективность паровой обдувки сильно снижается, так как плотный слой отложений с трудом поддается удалению паровой струей.

5.2.3. При сжигании многозольных топлив, характеризующихся абразивной золой, и применении чрезмерно высоких обдувающих напоров наблюдается парозоловой износ труб поверхности нагрева, зависящий от величины динамического напора струи, продолжительности действия обдувочного аппарата, концентрации золы в дымовых газах и ее абразивности.

Анализ показывает, что величина износа стенки трубы от воздействия парозоловой струи изменяется пропорционально комплексу

$$K=A\mu_г\left(\frac{T_г}{273}\right)^{0,5}H^{1,5}_{пов}\tau_{вр}.$$

Здесь $\mu_г=\frac{10A^р a_{ун}}{v_г}$ — концентрация золы в газах при 0° С, г/м³ ($A^р$ — зольность топлива, %) [4];

$T_г$ — температура газов, К;

$A$ — коэффициент абразивности золы, мм·с³/г·ч.

При сжигании многозольных топлив с абразивной золой рекомендуется уменьшать время включения аппарата в работу путем сокращения продолжительности цикла обдувки (числа оборотов обдувочной трубы). В ряде случаев необходимо понижать величину динамического напора струи, например путем перехода на обдувочные аппараты другого типа .

5.2.4. Рекомендуемые типы аппаратов для обдувки экранов, число обдувок в смену и продолжительность цикла обдувки в зависимости от рода сжигаемого топлива приведены в табл. 7.

*Таблица 7*

| Вид топлива | Тип аппарата | Частота вращения обдувочной трубы $n$, об/мин | Рекомендуемая длительность цикла обдувки, с | Число обдувок в смену |
|---|---|---|---|---|
| АШ, каменные угли Донбасса | ОПР-5-58 | 37,5 | 20 | 1 |
| | ОМ-0,35 | 16,0 | | |
| Подмосковные угли | ОГРЭ | | — | 3 |
| | ОМ-0,35 | | 5—6 | 2 |
| *Назаровский* уголь | ОГРЭ | | — | 3 |
| | ОМ-0,35 | | 20 | 2 |
| Экибастузский уголь | ОПР-5-58 | 37,5 | 3—5 | 1 |
| | ОМ-0,35 | 16,0 | | |
| Эстонские сланцы | ОГРЭ | | — | 4 |

При сжигании бурого подмосковного угля и двух обдувках топки в смену рекомендуется понизить длительность цикла обдувки до 5—6 с. При сжигании многозольного экибастузского угля, отличающегося высокоабразивной золой, при обдувке один раз в смену длительность цикла обдувки следует понизить до 3—5 с.

5.2.5. При сжигании шлакующих топлив и большой частоте обдувки экранов (3—4 раза в смену) рекомендуется применение обдувочных аппаратов типа ОГРЭ с вращательно-поступательным движением сопловой головки. Дистанция эффективной обдувки для аппарата ОГРЭ $R_{эф} \approx 3200$ мм.

На дистанциях $R \approx 2200 \div 3200$ мм динамический напор струи понижается в пределах $H_{пов} = 800 \div 300$ кгс/м$^2$; при $R \leqslant 2200$ мм $H_{пов} \approx 800$ кгс/м$^2$.

**5.3. Обдувочные аппараты для очистки ширмовых и конвективных (коридорных) поверхностей нагрева**

5.3.1. Для очистки ширмовых и конвективных (коридорных) поверхностей применяются обдувочные аппараты типа ОГ.

Согласно выполненным расчетам (раздел 4) максимальный динамический напор на поверхности ширмы (конвективного пакета) в момент нахождения сопл перед ширмой при начальном давлении пара $p_1 = 14$ кгс/см$^2$ составляет $H^{max}_{\alpha=0} \approx 4500$ кгс/м$^2$ на расстоянии от оси аппарата 580 мм при $d_0 = 16$ мм ($d_2 = 22$ мм). При этом дистанция эффективной обдувки составляет $R_{эф} \approx 1400$ мм. При $d_0 = 12$ мм ($d_2 = 16$ мм) $H^{max}_{\alpha=0} \approx 2600$ кгс/м$^2$ на расстоянии 550 мм от оси аппарата, дистанция эффективной обдувки $R_{эф} \approx 1100$ мм.

5.3.2. Для предупреждения парозолового износа труб ширмовых и конвективных перегревателей при сжигании многозольных топлив с абразивной золой рекомендуется снижать максимальный динамический напор струи путем уменьшения диаметра сопл $d_0$ с 16 до 12 мм.

В некоторых случаях, например при сжигании эстонских сланцев, уменьшение диаметра сопл оказывается недостаточным и необходимо применять аппараты типа ОГП, где снижается давление пара перед соплами при приближении сопловой головки к поверхности и, следовательно, понижается максимальный динамический напор струи на поверхности ($H_{пов} = 500$ кгс/м$^2$ при $p_1 = 4$ кгс/см$^2$ и $d_0 = 10$ мм).

5.3.3. Рекомендуемые для очистки ширмовых и конвективных перегревателей типы обдувочных аппаратов, размеры сопл, значения максимальных динамических напоров струи и дистанции эффективной обдувки в зависимости от вида топлива приведены в табл. 8. Там же приведены ориентировочные числа включений аппаратов в смену. Влияние абразивности и концентрации золы, максимальной величины динамического напора струи на поверхности и длительность работы обдувочных аппаратов учитывались величиной комплекса $K$ (см. 5.2.3).

5.3.4. Для обдувки конвективных (коридорных) пучков в зоне умеренных температур газов (не выше 600° С) могут устанавливаться обдувочные аппараты вращающегося типа ОН, снабженные большим числом мелких сопл диаметром $d_0 = 6$ мм ($d_2 = 9$ мм). Для предупреждения парозолового износа поверхности нагрева при сжигании многозольных топлив рекомендуется ограничивать длительность цикла обдувки (число оборотов обдувочной трубы) в зависимости от вида топлива значениями, приведенными в табл. 8.

*Таблица 8*

| Тип аппарата | Вид поверхности | Топливо | Диаметр сопла $d_0/d_2$ (внутренний)/(наружный) | Максимальный динамический напор $H^{max}_{\alpha=0}$, кгс/м$^2$ | Дистанция эффективной обдувки $R_{эф}$, мм | Число вращений аппарата за цикл $m$ | Число обдувок в смену |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ОГ | Ширмы и коридорные пучки | АШ, каменные угли Донбасса | 16/22 | 4500 | 1400 | — | 0,33 |
| ОГ | То же | Подмосковный уголь | 16/22 | 4500 | 1400 | — | 0,33 |
| | | То же | 12/16 | 2600 | 1100 | — | 1 |
| ОГ | „ | Экибастузский уголь | 12/16 | 2600 | 1100 | — | 0,33 |
| ОГ | „ | Угли Канско-Ачинского бассейна | 16/22 | 4500 | 1400 | — | 1 |
| ОГП | Ширмы | Эстонские сланцы | 10/14 | 500 | 700 | — | 1 |
| ОН | Коридорные пучки | АШ, каменные угли Донбасса | 6/9 | 2350* | — | 8 | 0,33 |
| ОН | То же | Подмосковный уголь | 6/9 | 2350* | — | 4 | 0,33 |
| ОН | „ | Экибастузский уголь | 6/9 | 2350* | — | 2 | 0,33 |

* На расстоянии от поверхности нагрева $R_x = 350$ мм.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 1*

*Рекомендуемое*

# РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ВЫБОРУ ТИПОВ ОБДУВОЧНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА И ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ ЕЕ ИЗНОСА

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Выбор типа и конструкции обдувочного аппарата зависит от вида поверхности нагрева, рода сжигаемого топлива, частоты включения обдувки и т. д. Выбор обдувочных аппаратов должен удовлетворять требованиям как эффективной очистки, так и надежной работы обдуваемой поверхности без заметного ее износа.

1.2. При высоких значениях максимальных динамических напоров, развиваемых аппаратами и высокой концентрации золы в газах обдувающая струя сдувает слой отложений с поверхности труб и изнашивает металл.

где $J$ — глубина износа стенки трубы, мм;

$\mu_m$ — концентрация золы по оси обдувочной струи в месте встречи с поверхностью, г/м$^3$;

$u_m$ — скорость на оси струи в месте встречи с поверхностью, м/с;

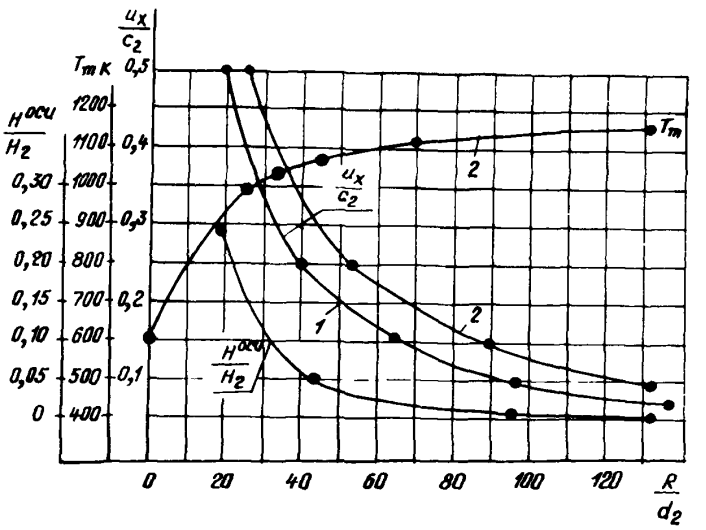
$v_m$ — удельный объем пара там же, м$^3$/кг;

$\tau$ — время изнашивания, ч;

$A$ — коэффициент абразивности золы, мм · с$^3$/г · ч.

На чертеже приложения показано изменение температуры и скорости на оси неизотермической струи (начальная температура пара $T_п$=600 К, температура газов $T_г$=1200 К, параметр сжимаемости $\frac{T_п}{T_г}$=0,5). При относительных дистанциях $\frac{R_x}{d_2}$ =

**Профили относительных скоростей и динамических напоров и температур на оси изотермической и неизотермической струи**




*1* — для изотермической струи; *2* — для неизотермической струи $T_п$=600 К; $T_г$=1200 К; a=0,05

## 2. ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ПАРОЗОЛОВОГО ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА

2.1. Износ стенки труб поверхности нагрева в общем случае определяется следующей зависимостью:

$$J = A\mu_m u_m^3 \tau = A\mu_m \tau (2g v_m H_{пов})^{1,5},$$

=60÷70 температура на оси струи $T_m$ близка температуре газа $\frac{T_m}{T_г}$=0,92. Количество газа в струе (по уравнению смешения) приблизительно 83%, концентрация золы в струе составит 83% от концентрации ее в газах (размываемые струей натрубные отложения не учитываются). Величина же динамического напора на оси для изотермической и неизотермической струй сохраняется одинаковой

(см. чертеж приложения). Учитывая изложенное, принимаем

$$\rho_m = \varepsilon_1 \mu_г^0 \quad \text{и} \quad v_m = \varepsilon_2 v_г,$$

где $\mu_г^0$ — концентрация золы в газах при 0° С, г/м³;

$v_г$ — удельный объем газов, м³/кг;

$\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$ — коэффициенты.

Приняв время изнашивания поверхности пропорциональным времени работы обдувочного аппарата (при его вращении), получим:

$$J = MA\rho_г^0 \frac{273}{T_г}\left(\frac{T_г}{273}\right)^{1,5} H_{пов}^{1,5}\tau_{вр} =$$

$$= MA\rho_г^0\left(\frac{T_г}{273}\right)^{0,5} H_{пов}^{1,5}\tau_{вр},$$

где $M$ — коэффициент пропорциональности (зависит также от дистанции обдувки $\frac{R_x}{d_2}$).

Таким образом, износ поверхности при ее обдувке зависит от комплекса

$$K = A\mu_г^0\left(\frac{T_г}{273}\right)^{0,5} H_{пов}^{1,5}\tau_{вр}.$$

Величина комплекса $K$ может быть использована для оценки интенсивности парозолового износа поверхности нагрева при обдувке.

2.2. Время работы обдувочного аппарата за год работы котла составит

$$\tau_{вр} = \frac{zmN}{60n} \text{ ч/год},$$

где $m$ — число оборотов аппарата за цикл обдувки, об.;

$z$ — число обдувок поверхности, отнесенное к 1 ч, 1/ч;

$n$ — частота вращения обдувочной трубы, об/мин;

$N$ — число часов работы котла в году; принимаем $N = 7000$ ч/год.

Концентрация золы в газах

$$\mu_г^0 = \frac{10A^р a_{ун}}{v_г} \text{ г/м}^3,$$

где $a_{ун}$ — доля золы, уносимой газами.

2.3. При сжигании многозольных топлив с абразивной золой необходимо уменьшать время включения аппарата в работу путем сокращения длительности цикла обдувки.

В ряде случаев приходится понижать величину динамического напора струи путем уменьшения диаметра сопла $d_0$ или изменением схемы работы аппарата (в аппаратах типов ОГРЭ и ОГП).

Опыт работы котлов типа ТП-17 на эстонских сланцах показал, что при включении обдувочных аппаратов типа ОПР-5-58 4—5 раз в смену износ стенок экранных труб достигал 0,3—0,4 мм/мес (3—4 мм/год). Время работы обдувочного аппарата составляло ориентировочно $\tau_{вр} \approx 21$ ч/год (см. табл. 1 приложения). При этом величина комплекса $K$ равна

$$K = A\rho_г^0\left(\frac{T_г}{273}\right)^{0,5} H_{пов}^{1,5}\tau_{вр} = 14,5\cdot 10^{-9}\cdot 84\left(\frac{1373}{273}\right)^{0,5} \times$$

$$\times 1500^{1,5}\cdot 21 \approx 3,35.$$

Из этого можно сделать вывод, что для понижения скорости износа до допустимого значения 0,22 мм/год (при сроке службы труб в 7 лет износ стенки труб составит 1,5 мм, что допустимо) величину комплекса $K$ следует снизить до 0,2—0,24.

*Таблица 1*

| Топливо | Тип аппарата | $n$, об/мин | $m$, об | $z$, 1/ч | $\tau_{вр}$, ч/год | $\left(\frac{T_г}{273}\right)^{0,5}$ | $A$ | $\mu_г$, г/м³ | $H_{пов}$, кгс/м² | $H_{пов}^{1,5}$ | $K$ | $\frac{K}{0,22}$ | Сопло $d_0$, мм | Давление $p_1$, кгс/см² |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| АШ и каменные угли Донбасса | ОПР-5-58 | 37,5 | 12,0 | 0,125 | 4,65 | 2,25 | $14\cdot 10^{-9}$ | 25 | 1500 | 58 200 | 0,22 | 1,0 | 20 | 18 |
| | ОМ-0,35 | 16,0 | 5,0 | 0,125 | 4,50 | 2,25 | $14\cdot 10^{-9}$ | 25 | 1500 | 58 200 | 0,21 | 0,95 | 20 | 18 |
| Экибастузский уголь | ОПР-5-58 | 37,5 | 2,0 | 0,125 | 0,77 | 2,25 | $24\cdot 10^{-9}$ | 70 | 1500 | 58 200 | 0,17 | 0,78 | 20 | 18 |
| | ОМ-0,35 | 16,0 | 1,5 | 0,125 | 1,35 | 2,25 | $24\cdot 10^{-9}$ | 70 | 1500 | 58 200 | 0,30 | 1,35 | 20 | 18 |
| Подмосковный уголь | ОГРЭ | 16,0 | 2,0 | 0,40 | 5,80 | 2,25 | $14\cdot 10^{-9}$ | 54 | 800 | 22 500 | 0,22 | 1,0 | 20 | 18 |
| | ОМ-0,35 | 16,0 | 1,5 | 0,25 | 2,70 | 2,25 | $14\cdot 10^{-9}$ | 54 | 1500 | 58 200 | 0,27 | 1,2 | 20 | 18 |
| Эстонские сланцы | ОПР-5-58 | 37,5 | 12,0 | 0,56 | 21,0 | 2,25 | $14,5\cdot 10^{-9}$ | 84 | 1500 | 58 200 | 3,35 | 15,0 | 20 | 18 |
| | ОГРЭ | 16,0 | 2,0 | 0,50 | 7,30 | 2,25 | $14,5\cdot 10^{-9}$ | 84 | 500 | 11 200 | 0,22 | 1,0 | 20 | 18 |
| | ОГРЭ | 16,0 | 2,0 | 0,50 | 7,30 | 2,25 | $14,5\cdot 10^{-9}$ | 84 | 800 | 22 500 | 0,44 | 2,0 | 20 | 18 |

## 3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА ПРИ ОБДУВКЕ

### 3.1. Рекомендации по режимам работы обдувочных аппаратов для радиационных поверхностей нагрева

3.1.1. Значения комплекса $K$ для обдувочных аппаратов типов ОПР-5-58 и ОМ-0,35 при сжигании разных видов топлива приведены в таблице приложения.

3.1.2. При сжигании АШ и каменных углей Донбасса, обдувке аппаратом ОПР-5-58 один раз в смену ($z=0{,}125$) и числе оборотов обдувочной трубы $m=12$ об. величина $K=0{,}22$. Такая же величина $K$ и при обдувке аппаратами типа ОМ-0,35 и $m=5$ об.

3.1.3. При сжигании многозольного экибастузского угля и обдувке поверхности один раз в смену ($z=0{,}125$) длительность цикла обдувки должна быть сокращена до $m=2$ об. при использовании аппаратов ОПР-5-58; до $m=1{,}5$ об. при применении аппаратов ОМ-0,35, при этом $K=0{,}17\div0{,}30$. Продолжительность цикла обдувки $\tau=3{,}2$ с — для аппаратов ОПР-5-58 и $\tau=5{,}5$ с — для аппаратов ОМ-0,35.

3.1.4. При сжигании подмосковного угля и двухразовой обдувке топки в смену аппаратами ОМ-0,35 продолжительность работы обдувочного аппарата должна быть сокращена до $m=1{,}5$ об. ($\tau=5{,}5$ с), при этом $K=0{,}27$. При работе аппаратов ОГРЭ, трехразовой обдувке в смену ($z\approx0{,}4$) и $H_{пов}=800$ кгс/м$^2$ $K=0{,}22$.

3.1.5. В котлоагрегатах, работающих на сланцах, ввиду недопустимо большого износа экранов при обдувке аппаратами типа ОПР-5-58 ($K=3{,}3$) были применены аппараты нового типа — ОГРЭ, обеспечившие умеренные значения динамических напоров на поверхности экранов: $H_{пов}=800\div500$ кгс/м$^2$. В этих условиях плотные отложения с труб обдувочной струей не удаляются и износ труб не наблюдается. Значения комплекса $K=0{,}22\div0{,}44$.

Вследствие наличия на трубах экранов плотного слоя отложений для очистки экранов сланцевых котлов целесообразно применение водяной обдувки.

При расшлаковке водой происходит разрушение и удаление плотного слоя отложений благодаря эффекту «термошока».

### 3.2. Рекомендации по режимам работы обдувочных аппаратов для ширмовых и конвективных (коридорных) поверхностей нагрева

3.2.1. При сжигании бурого подмосковного угля и обдувке ширмового и конвективного перегревателей аппаратами типа ОГ с соплами $d_0=16$ мм максимальный динамический напор на поверхности составляет $H^{max}=4500$ кгс/м$^2$.

При обдувке один раз в сутки величина $K=0{,}32$, что несколько велико.

Если применить сопла меньшего диаметра ($d_0=12$ мм), то при двухразовой обдувке в сутки (что требуется при шлакующих топливах) получим $K=0{,}28$; при одноразовой обдувке $K=0{,}14$.

3.2.2. При сжигании АШ и каменных углей Донбасса и обдувке поверхности один раз в сутки соплами диаметром $d_0=16$ мм $K=0{,}15$.

3.2.3. При сжигании экибастузского угля и обдувке поверхности один раз в сутки соплами диаметром $d_0=16$ мм величина $K=0{,}7$, что весьма велико.

Для этого высокозольного и высокоабразивного угля необходимо применять сопла $d_0\leqslant12$ мм, при этом $H^{max}_{\alpha=0}\leqslant2600$ кгс/м$^2$ и $K\leqslant0{,}31$.

*Таблица 2*

| Топливо | Тип аппарата | $n$, об/мин | $m$, об. | $z$, 1/ч | $\tau_{вр}$, ч/год | $\left(\frac{T_г}{273}\right)^{0,5}$ | $A$ | $\rho_г$, г/м$^3$ | $H_{пов}$, кгс/м$^2$ | $H^{1,5}_{пов}$ | $K$ | $\frac{K}{0,22}$ | Сопло $d_0$, мм | Давление $p_1$, кгс/см$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| АШ и каменные угли Донбасса | ОГ | 16 | 2 | 0,0415 | 0,605 | 2,25 | $14\cdot10^{-9}$ | 25 | 4550 | $307\cdot10^3$ | 0,15 | 0,68 | 16 | 14 |
| Экибастузский уголь | ОГ | 16 | 2 | 0,0415 | 0,605 | 2,25 | $24\cdot10^{-9}$ | 70 | 4550 | $307\cdot10^3$ | 0,70 | 3,20 | 16 | 14 |
| | | | | 0,0415 | 0,605 | 2,25 | $24\cdot10^{-9}$ | 70 | 2630 | $135\cdot10^3$ | 0,31 | 1,40 | 12 | 14 |
| Подмосковный уголь | ОГ | 16 | 2 | 0,0415 | 0,605 | 2,25 | $14\cdot10^{-9}$ | 54 | 4550 | $307\cdot10^3$ | 0,32 | 1,45 | 16 | 14 |
| | | | | 0,0830 | 1,220 | 2,25 | $14\cdot10^{-9}$ | 54 | 2630 | $135\cdot10^3$ | 0,28 | 1,20 | 12 | 14 |
| Эстонские сланцы | ОГ | 16 | 2 | 0,1250 | 1,820 | 2,25 | $14{,}5\cdot10^{-9}$ | 84 | 4550 | $307\cdot10^3$ | 1,52 | 6,90 | 16 | 14 |
| | ОГ | 16 | 2 | 0,1250 | 1,820 | 2,25 | $14{,}5\cdot10^{-9}$ | 84 | 2630 | $135\cdot10^3$ | 0,67 | 3,00 | 12 | 14 |
| | ОГП | 16 | 2 | 0,1250 | 1,820 | 2,25 | $14{,}5\cdot10^{-9}$ | 84 | 500 | $11{,}2\cdot10^3$ | 0,056 | 0,25 | 10 | 14/4 |
| АШ и каменные угли Донбасса | ОН | 16 | 8 | 0,0415 | 2,70 | 1,8 | $14\cdot10^{-9}$ | 25 | 2350 | $125\cdot10^3$ | 0,20 | 0,9 | 6 | 14 |
| Подмосковные угли | ОН | 16 | 4 | 0,0415 | 1,35 | 1,8 | $14\cdot10^{-9}$ | 54 | 2350 | $125\cdot10^3$ | 0,22 | 1,0 | 6 | 14 |
| Экибастузский уголь | ОН | 16 | 2 | 0,0415 | 0,67 | 1,8 | $24\cdot10^{-9}$ | 70 | 2350 | $125\cdot10^3$ | 0,24 | 1,2 | 6 | 14 |

3.2.4. При сжигании эстонских сланцев и обдувке ширм один раз в смену применение аппаратов типа ОГ с соплами диаметром $d_0=12\div16$ мм по опыту эксплуатации является недопустимым из-за интенсивного износа труб ширм. В этом случае $K=0{,}67\div1{,}52$ (см. табл. 2 приложения).

Ввиду этого для очистки ширмовых перегревателей сланцевых котлов применяется обдувочный аппарат типа ОГП, в котором при приближении сопловой головки к ширме давление пара перед соплом понижается до 3—4 кгс/см². Последнее снижает максимальный динамический напор струи до $H_{пов}=500$ кгс/м² (при $d_0=10$ мм) при этом $K=0{,}056$.

Из-за высокотемпературной коррозии поверхности труб в среде, образующейся при сжигании эстонских сланцев, происходит износ поверхности ширм, несмотря на сравнительно умеренные значения динамического напора струи на поверхности.

3.2.5. При обдувке конвективных пучков аппаратами вращающегося типа ОН (в зоне температур газов не выше 600° С) длительность цикла обдувки должна задаваться в зависимости от вида топлива.

При сжигании АШ и каменных углей Донбасса, обдувке поверхности один раз в сутки и числе вращений обдувочной трубы за цикл обдувки $m=8$ (длительность 30 с) величина комплекса $K\approx0{,}2$.

При сжигании бурого подмосковного угля, обдувке один раз в сутки и $m=4$ (длительность обдувки 15 с) $K=0{,}22$.

При сжигании экибастузского угля, обдувке один раз в сутки и $m=2$ (длительность обдувки 7,5 с) $K=0{,}24$.

Приведенные выше значения комплекса $K$ невысоки, что должно обеспечить сравнительно надежную работу поверхности нагрева при ее обдувке.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 2*

*Справочное*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аппараты паровой и воздушной обдувки поверхностей нагрева котлов паровых стационарных. ОСТ 108.838.02—75. Взамен ОСТ 24.838.08.

2. Дубовский И. Е., Песелев М. П. Исследование и расчет сопловых устройств обдувочных аппаратов. — «Энергомашиностроение», 1973, № 10.

3. Обдувочные аппараты и установки дробевой очистки котлов. Каталог-справочник 18.8.71. НИИИнформтяжмаш, 1972.

4. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Госэнергоиздат, 1973.

## СОДЕРЖАНИЕ


Стр.

1. Условные обозначения . . . . . 1
2. Характеристики обдувочных аппаратов и параметры пара для обдувки . . . 1
3. Зависимости для определения динамических напоров обдувающих струй на поверхности нагрева . . . . . 8
4. Расчеты обдувочных аппаратов . . . . . 9
5. Рекомендации по проектированию аппаратов обдувки. . . . . 12

Приложение 1 . . . . . 14

Приложение 2 . . . . . 18

Ответственный за выпуск *В. С. Розанова.*

Редактор *Г. Д. Семенова*

Техн. ред. *Н. П. Белянина.* Корректор *С. М. Косенкова.*

Сдано в набор 10.02.76. Подписано к печ. 20.04.76. Формат бум. 60×90 1/8.
Объем 2 1/2 печ. л. Тираж 800. Заказ 182. Цена 50 коп.

Редакционно-издательский отдел ЦКТИ им. И. И. Ползунова.
194021, Ленинград, Политехническая ул., д. 24.

gost.e-ecolog.ru