

РУКОВОДСТВО ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ КАНАЛОВ ДЛЯ ПОДАЧИ ВТОРИЧНОГО ВОЗДУХА И ДЫМОХОДОВ КОТЛОВ

Введение

В настоящем руководстве изложена информация по проектированию воздуховодов, соединяющих нагнетатель вторичного воздуха с двублочными горелками ELCO, а также дымоходы котлов с моно- и двублочными горелками ELCO.

Данное руководство носит рекомендательный характер и может быть использовано как дополнение к существующим регламентирующим документам.

Гидродинамически правильное движение вторичного воздуха и уходящих дымовых газов, очень важно для правильной и безотказной работы горелки, в особенности горелок с низким и сверхнизким уровнем выбросов NOx.

Данное руководство содержит примечания и рекомендации по конструированию и проектированию систем, с учетом оптимизированной гидродинамики потока и механических требований, предъявляемых к воздуховодам.

Содержание

Введение	1
1 Каналы для подачи вторичного воздуха	3
1.1 Гидродинамика потока	3
Скорость воздушного потока	3
Подключение воздуховодов к нагнетателю воздуха	4
Изгибы	4
Изменения поперечного сечения	6
Конструкция воздуховодов перед воздушными заслонками или на входе в горелку	7
1.2 Рекомендации по проектированию	7
Конструкция, ориентированная на прочность, с соблюдением макс. статического давления	8
Принцип отсутствия вибрации	8
Дополнительная информация	8
2 Дымоходы	9
2.1 Гидродинамика потока	9
Скорость воздушного потока	9
Изгибы и изменения поперечного сечения	10
Соединение дымохода с дымовой трубой	10
Дымовые трубы для множества дымоходов	11
Рассмотрение динамики потока в случае объединения потоков уходящих газов	11
2.2 Рекомендации по проектированию	12
Принцип отсутствия вибрации	12
Дополнительная информация	12
3 Возможные последствия при несоблюдении требований	13
Список источников	14

1 Каналы для подачи вторичного воздуха

Система подачи вторичного воздуха является очень важной частью каждой котельной установки с двухблочными горелками. Гидродинамически правильная конструкция этой системы крайне важна для правильной работы горелки и стабильности ее пламени.

Тщательное планирование и проектирование воздуховодов, а также гидродинамический расчет элементов, являются основными требованиями для надежной работы горелок и, следовательно, для стабильного процесса сгорания.

Это, в частности, относится к системам сжигания с низким содержанием NO_x, которые имеют более низкий показатель стабильности пламени, чем стандартные горелки из-за высокой внутренней и внешней рециркуляции дымовых газов (FGR), и, таким образом, более чувствительны к недостатку подачи вторичного воздуха.

Таким образом, неправильно спроектированные воздуховоды могут вызвать ряд проблем (например, повышенный уровень шума, вибрации или пульсации, чрезмерные потери давления и т.д.), устранение которых может вызвать дорогостоящие доработки конструкции, и, следовательно, задержки при вводе в эксплуатацию.

Таким образом, цель состоит в том, чтобы предотвратить отрыв потока внутри воздуховода, чтобы поток вторичного воздуха направлялся с постоянным и однородным профилем скорости, насколько это возможно, без завихрения или вращения, а также с постоянным распределением поля давления и скорости на входе в горелку.

1.1 Гидродинамика потока

Скорость воздушного потока

- Средняя скорость потока холодного (< 250 °C) вторичного воздуха должна составлять примерно 15 м/с в расчетной точке, но не должно быть ниже 12 м/с.
- При температуре вторичного воздуха > 250 °C в расчетной точке допускается максимальная скорость 20 м/с.
- Расчетная точка соответствует рабочему объемному расходу при номинальной производительности с учетом существующих условий эксплуатации.
- Рекомендуемые скорости потока в зависимости от температуры вторичного воздуха показаны на следующей диаграмме:

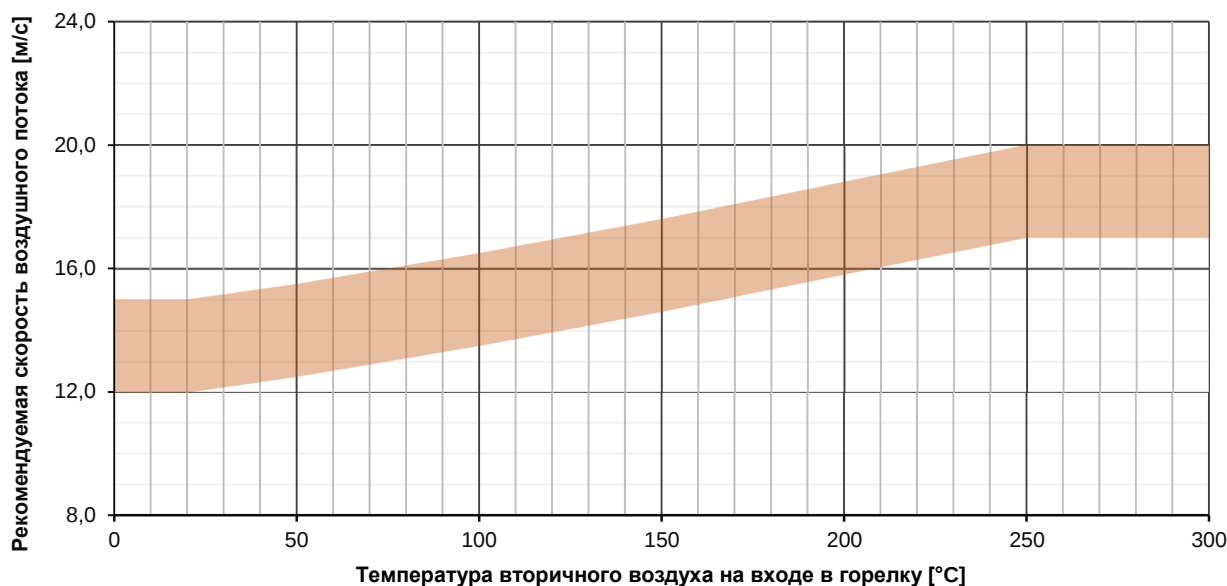


Рис. 1.: Рекомендуемая скорость потока в воздуховодах

Подключение воздуховодов к нагнетателю воздуха

- К выбору места для установки вентилятора следует подходить с особым вниманием. Соединительная линия между вентилятором и фланцем горелки должна быть короткой и иметь как можно меньше изменений направления.
- Центробежные вентиляторы имеют характерный профиль скорости в нагнетательном патрубке (см. рис. 2а и 2б). Максимальная скорость распределена не равномерно по сечению воздуховода, а смещена в сторону направления крутки потока. Это особенно важно, если изгибы или расширения в поперечном сечении следуют непосредственно после выпускного патрубка.

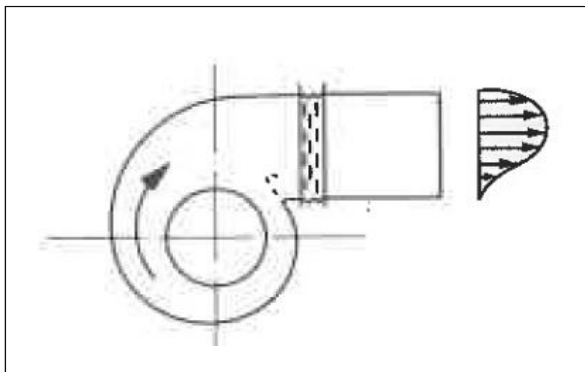


Рис. 2а: Воздуховод за выпускным отверстием вентилятора слишком короткий [1]

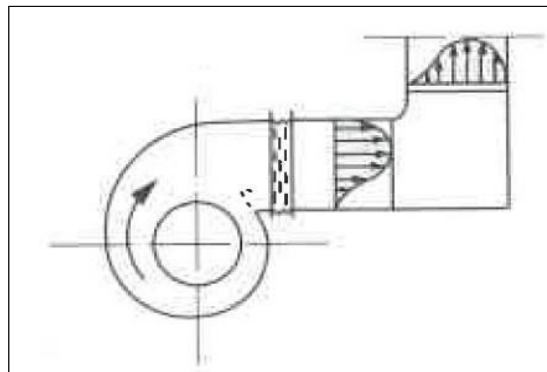


Рис. 2б: Неравномерное распределение скорости на выходе из вентилятора также влияет на профиль потока и падение давления далее по системе [1]

- Рекомендуется предусмотреть секцию замедления/успокоения потока до средней скорости 15 м/с, за центробежным нагнетателем длиной L_{min} , равную 2,5-кратному гидравлическому диаметру. На более высоких скоростях рекомендуется увеличивать половину диаметра на каждые дополнительные 5 м/с. Пример: при средней скорости 20 м/с, длина успокаивающей секции L_{min} на выходе вентилятора должна быть в 3 раза больше гидравлического диаметра.

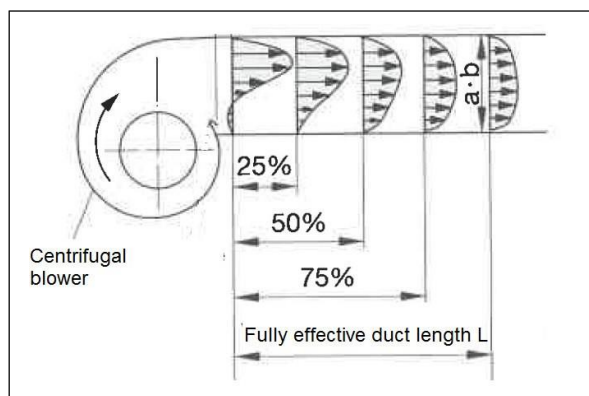


Рис. 3: Профиль скорости в канале воздуховода за центробежным вентилятором [1]

- Установка дефлекторов или направляющих пластин в секции успокоения не допускается.
- Следует избегать разветвлений, изменений направления и большого расширения поперечного сечения непосредственно на выходе из вентилятора.

Изгибы

- Длина воздуховодов, а также количество изгибов и изменений поперечного сечения должны быть ограничены до количества абсолютно необходимых.
- В качестве изгибов предпочтительно использование наиболее аэродинамически выгодных на 30°, 45° или 60°.
- Следует избегать соединений под углом 90°.

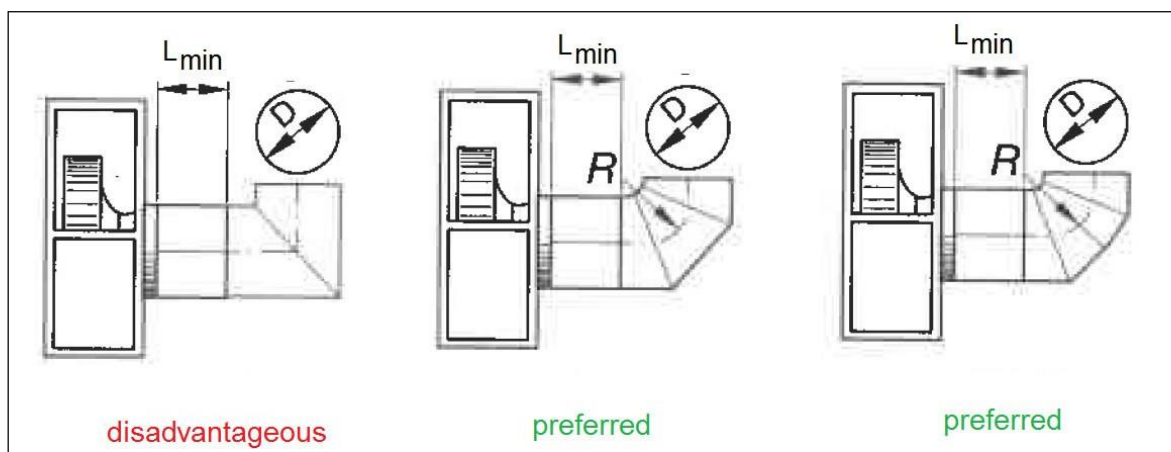


Рис. 4: Примеры различных соединений воздуховодов [1]

Слева: Простой отвод 90°

Середине: 90°- отвод с 3-мя сегментами

Справа: 90°- отвод с 4-мя сегментами

- Кроме того, в случае применения прямоугольных воздуховодов, изгибы под углом $> 45^\circ$, когда впоследствии требуется постоянное распределение скорости, должны быть реализованы с помощью направляющих пластин (рис. 4). Внутренний радиус каждого колена/изгиба должен быть достаточно большим. Отношение ширины канала к внутреннему радиусу $< 4/1$ является наиболее эффективным.
- Внутренние заостренные поверхности изгибов, без скруглений, не допустимы.

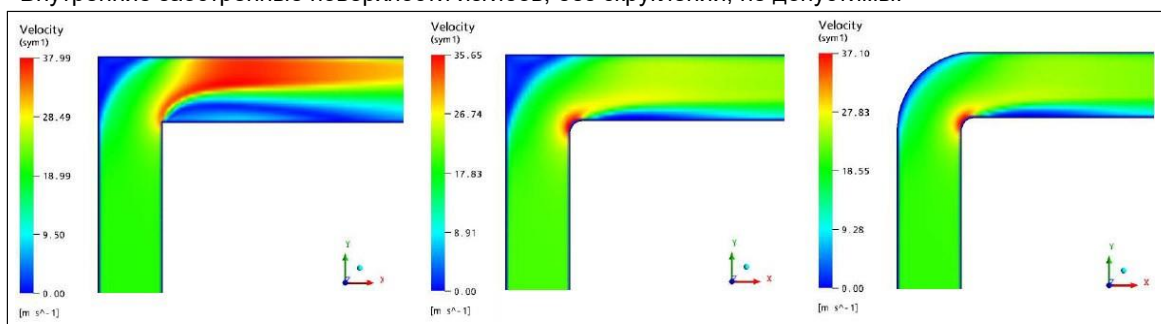


Рис. 5: CFD-анализ потока при отсутствии и наличии скруглений при изгибе 90° - без использования deflectорных пластин [4]

а) Слева: Ни внутренний, ни внешний радиус не скруглены

б) Середине: Внутренний радиус скругления выполнен с $0,2 \cdot H$

с) Справа: Внутренний радиус скругления выполнен с размером $0,2 \cdot H$; внешний радиус - с $1,2 \cdot H$

- Существует несколько технических альтернатив конструкции направляющих пластин. Предпочтительны специально спрофилированные лопасти с радиусом, равным внутреннему радиусу изгиба, равномерно распределенные по ширине канала (рис. 6b). При этом, внешний угол сгиба может быть не скруглен, потому как это не оказывает отрицательного влияния на профиль потока после поворота или на падение давления. Другой альтернативой являются лопасти с другим радиусом, первоначальный центр вращения которых совпадает с центром внутреннего радиуса.

Оптимальную конструкцию поворотов на 90° с направляющими пластинами см. в DIN EN 1505, приложение В (дополнительную информацию так же см. TGL 180-1524).

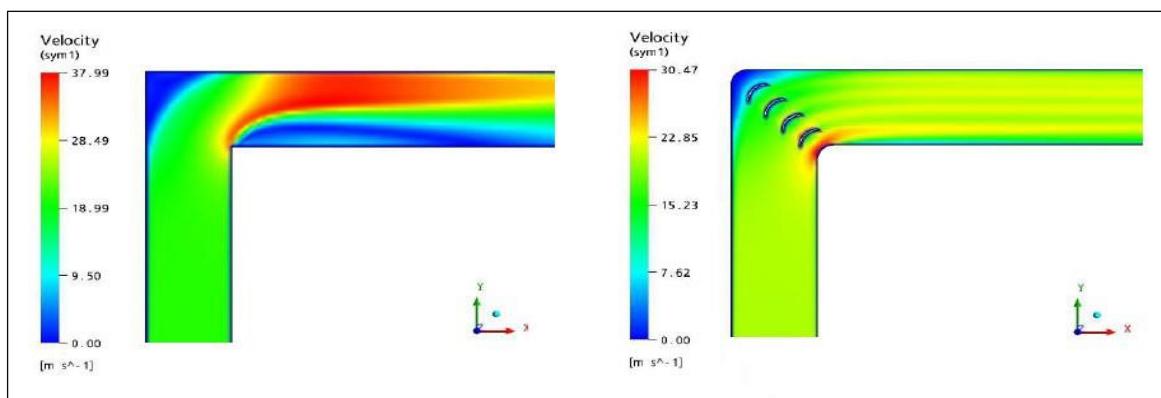


Рис. 6а (слева): Формирование неоднородного профиля потока за поворотом 90°, с учетом конструкции без направляющих пластин [4]

Рис. 6б (справа): Исполнение поворота на 90° с равномерно распределенными лопастями [4]

- Изгибы, при которых происходит увеличение поперечного сечения, не допускаются, поскольку это приводит к замедлению потока.
- В случае последовательных изгибов на одном уровне, следует выбирать наиболее меньшие углы поворотов.
- В случае последовательных изгибов в пространственном расположении минимальное расстояние «X» между осями каждого воздуховода должно быть в 4 раза больше гидравлического диаметра, чтобы могло наблюдаться замедление (успокоение) потока между выходом из первого поворота и входом во второй.
- Гидравлический диаметр прямоугольных каналов рассчитывается следующим образом:

$$D_{hydraulic} = 4 * \frac{A}{U} \quad (1)$$

D ...Диаметр

A ...Площадь поперечного сечения

U ...Смоченный периметр поперечного сечения

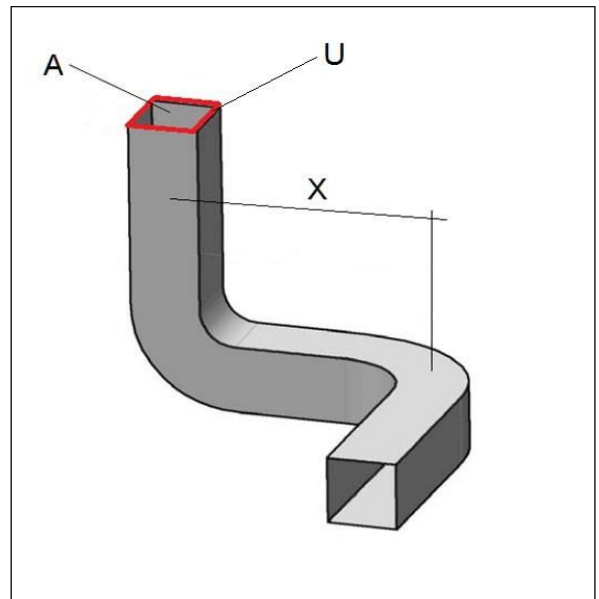


Рис. 7: Последовательные изгибы

Изменения поперечного сечения

- Прямоугольные переходы следует проектировать симметрично относительно оси потока, чтобы гарантировать равномерное распределение профиля скорости на выходе.
- Угол раскрытия между сечениями должен быть не более 7° для скорости потока до 15 м/с и не более 6° для скоростей > 15 м/с.
- Если невозможно сохранить угол раскрытия, необходимо установить вертикальные пластины, относящиеся к плоскости расширения, как показано на рис. 8 (формирование диффузоров), чтобы они соответствовали требованиям к углу раскрытия между ними (6-7°). В качестве альтернативы необходимо предусмотреть резкое расширение.

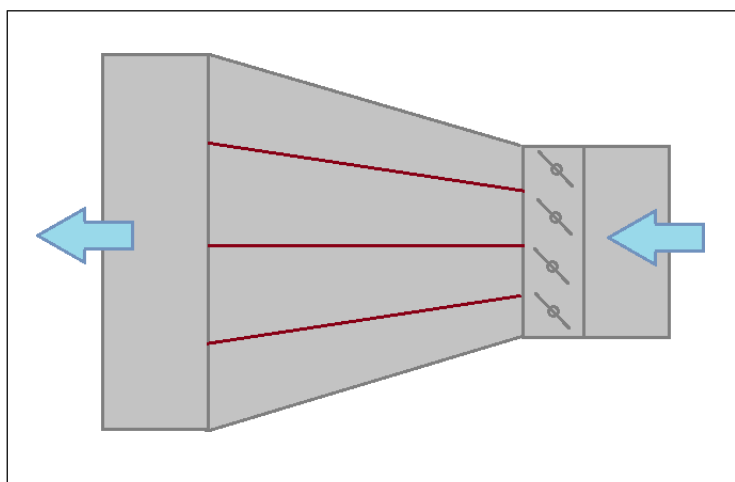


Рис. 8:
Пример исполнения вертикальных пластин в случае увеличения поперечного сечения

- Прямоугольные переходы-сужения так же должны быть симметричными. Угол наклона поверхностей воздуховода к оси канала должен быть как можно меньше.
- Для скоростей >20 м/с передние кромки также должны быть скошены или закруглены в начале сужения (длина/радиус фаски >0,1*ширина канала).
- В случае очень коротких соединений воздуховодов между вентилятором и горелкой (<3 м) следует избегать изменений поперечного сечения, чтобы поддерживать заданные скорости воздуха. Воздуховод должен быть спроектирован в размере соединительного фланца горелки.

Конструкция воздуховодов перед воздушными заслонками или на входе в горелку

- Как правило, количество воздуха, подаваемого на горелку, регулируется дроссельной заслонкой. По этой причине требуется однородный профиль потока перед заслонкой, в противном случае это может отрицательно повлиять на регулирующие характеристики дросселя или может возникнуть дополнительный акустический шум.
На входе в заслонку необходимо избегать асимметричных расширений, изменений поперечного сечения, резких изгибов или переходов от прямоугольного к круглому сечению и т.п.
- Неоднородный профиль потока или уже закрученный воздушный поток не только влияет на регулировочную характеристику дроссельной заслонки, но также может привести к проблемам с пламенем: нестабильность, неблагоприятная геометрия (асимметрия пламени, неправильное соотношение длина/ширина) и т.д.

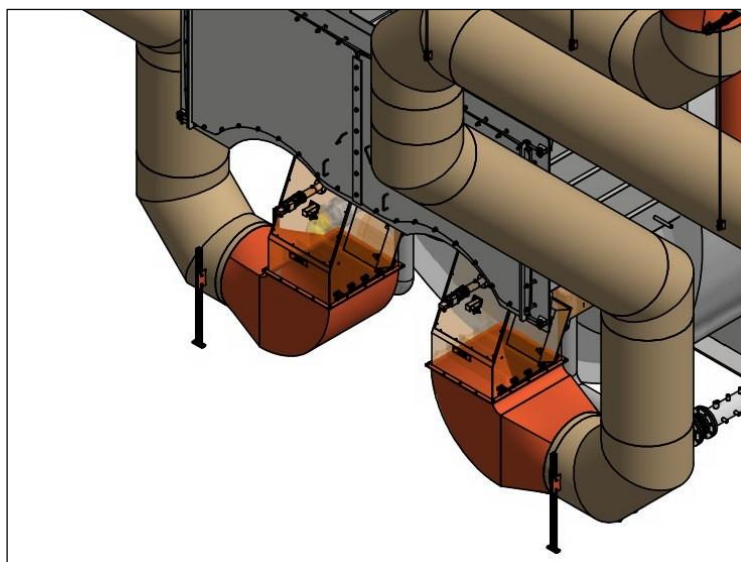


Рис. 9:
Пример неправильного
исполнения воздуховодов

- Локальная скорость потока перед дроссельной заслонкой не должна быть выше или ниже $\pm 10\%$ средней скорости потока по сечению воздуховода.
- Открытая дроссельная заслонка деформирует профиль скорости в сторону открытия. Рекомендуется использовать заслонки с противоположным положением шибера относительно деформации профиля потока. Если это невозможно, необходимо принять во внимание односторонний профиль скорости после заслонок в случае ответвлений и т.п.
Это можно сделать с помощью дополнительной секции замедления перед разветвлением.

1.2 Рекомендации по проектированию

Конструкция, ориентированная на прочность, с соблюдением макс. статического давления

- Воздуховоды должны быть спроектированы в соответствии с рабочими характеристиками нагнетателя: рабочего объемного расхода и приложенного статического давления.
- Воздуховоды должны быть рассчитаны как на статические, так и на динамические нагрузки.
- Отдельные элементы воздуховода должны быть сварными газонепроницаемыми, или модульными с фланцевыми соединениями.
- Наибольшее давление потока перед горелкой определяется противодавлением в камере сгорания и потерей давления самой горелки при номинальной мощности.
Давление потока на закрытую заслонку будет максимальное, в соответствии с характеристиками нагнетателя.

- В принципе, возможно более высокое давление нагнетателя при номинальной нагрузке. Однако при этом требуются дополнительные модификации корпуса, например дополнительное усиление со стороны горелки.

Табл. 1: Максимальное статическое давление при номинальной нагрузке горелки

Горелка	Максимальное статическое давление при номинальной нагрузке, мбар
EKDUO 2	80
EKDUO 3	80
EKDUO 4	80
RPD 20	80
RPD 30	80
RPD 40	80
RPD 50	80
RPD 60	80
RPD 70	80
RPD 80	80
RPD 100	80
RPD 130	125
RPD 160	125

Принцип отсутствия вибрации

- Воздуховоды должны быть установлены таким образом, чтобы температурные расширения были компенсированы, а колебания давления не приводили к механической вибрации системы воздуховодов.
- В системе должны быть предусмотрены компенсаторы для снятия напряжений и вибраций. Компенсаторы должны быть подобраны в соответствии с применением (тип смещения, максимальная температура применения, скорость потока, давление и т. д.) и установлены по спецификации производителя.
- Необходимо надежно закрепить воздуховоды. Недостаточно подвесить воздуховоды с помощью вертикальных резьбовых стержней или аналогичных приспособлений. Собственная нагрузка конструкции, а также динамическая сила воздушного потока, действующая на арматуру и монтажные детали, должны передаваться на опорную конструкцию с достаточной степенью безопасности.
- Вибрации воздуховодов в горизонтальном и в вертикальном направлении не допустимы.

Дополнительная информация

- Воздуховоды, подвергающиеся термическому и/или химическому воздействию, должны быть подвержены внешней и/или внутренней защите от коррозии.
- Если воздух для горения содержит в себе компоненты способствующие коррозии (например, SO₂, H₂S), необходимо выбрать материал, устойчивый к подобным нагрузкам, или подходящее покрытие. Данное требование применимо так же для уплотнительного материала фланцевых соединений.
- Если система воздуховодов допускает накопление конденсата, в соответствующих точках необходимо предусмотреть отводы сконденсированной влаги.
- Система должна быть спроектирована таким образом, чтобы внутри воздуховодов и корпуса горелки не мог скапливаться конденсат.
- Для осмотра системы воздуховодов должны быть предусмотрены смотровые отверстия. Отверстия должны быть доступны.
- Воздуховоды предварительно нагретого вторичного воздуха должны быть изолированы в зависимости от температуры в соответствии с DIN EN ISO 13732-1: 2008-12.
- В зависимости от требований к максимально допустимому уровню шума в помещении, в котором выполняется монтаж системы, может потребоваться дополнительная шумоизоляция. Мероприятия по шумоизоляции должны разрабатываться и планироваться специализированной компанией и должны соответствовать общей концепции мер направленных на снижения уровня шума.
- В случае использования устройств для измерения расхода воздуха (например, сопел Вентури, динамических трубок Пито или аналогичных) необходимо соблюдать требования производителя по установке. Особое внимание следует уделять гидродинамической однородности потока в месте установки измерительного прибора. Требуемая точность измерения и воспроизводимость результатов должны быть обеспечены во всем диапазоне регулирования объемного расхода воздуха. Для обеспечения соответствия выбросам CO и NO_x необходимо поддерживать максимальное отклонение +/- 3% измеренного значения от фактического объемного расхода.

2 Дымоходы

Система уходящих дымовых газов должна быть спроектирована с особым вниманием к предъявляемым рекомендациям и требованиям. Элементы системы уходящих дымовых газов: воздуховоды, глушители дымовых газов и/или заслонки дымовых газов, располагаются между выходом из котла и входом в дымовую трубу.

В следующих главах содержатся рекомендации по проектированию систем уходящих дымовых газов для обеспечения безотказной работы системы сжигания топлива в целом.

Несоблюдение этих рекомендаций может вызвать серьезные проблемы во время работы. Это, например, акустические шумы, негативное влияние на стабильность горения или чрезмерные вибрации воздуховодов и их компонентов.

Системы сжигания с низким содержанием NOx также более критичны в отношении вышеупомянутых эксплуатационных проблем из-за их схемы сжигания и их более низкой стабильности пламени.

По этой причине система уходящих дымовых газов должна быть спроектирована и смонтирована с особой тщательностью.

2.1 Гидродинамика потока

Скорость воздушного потока

- Средняя скорость потока в дымоходе должна составлять около 10 м/с при достаточно низких температурах уходящих газов ($< 100^{\circ}\text{C}$). При температуре дымовых газов $> 200^{\circ}\text{C}$ допускается максимальная скорость 20 м/с.
- Чем выше скорость дымовых газов, тем сильнее сказывается эффект отрыва потока. Следует избегать ускорения или замедления потока на пути к дымовой трубе.

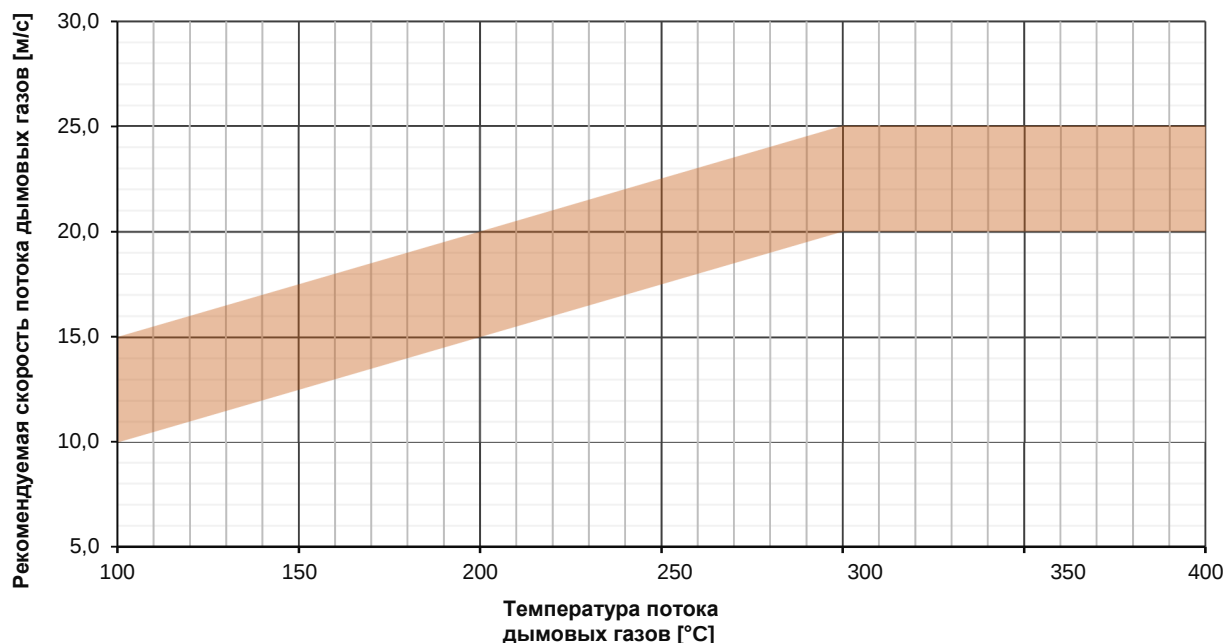


Рис. 10.: Рекомендуемая скорость потока дымовых газов

- Расчетная точка соответствует рабочему объемному расходу при номинальной производительности горелки.
- Дополнительные указания по проектированию можно найти в стандартах DIN EN 13384 для дымоходов, обслуживающих один источник тепла, или DIN EN 13084-1 для отдельно установленных дымоходов.

Изгибы и изменения поперечного сечения

- Необходимо избегать изгибов с острыми кромками; их следует заменить коленами, сегментами труб или направляющими пластинами. Рекомендации идентичны рекомендациям в главе 1 «Каналы для подачи вторичного воздуха».
- Трассировка воздуховодов дымохода не должна иметь множество изменений направлений потока, поскольку это может отрицательно влиять на уровень шума, а также приводить к скачку давления при запуске.

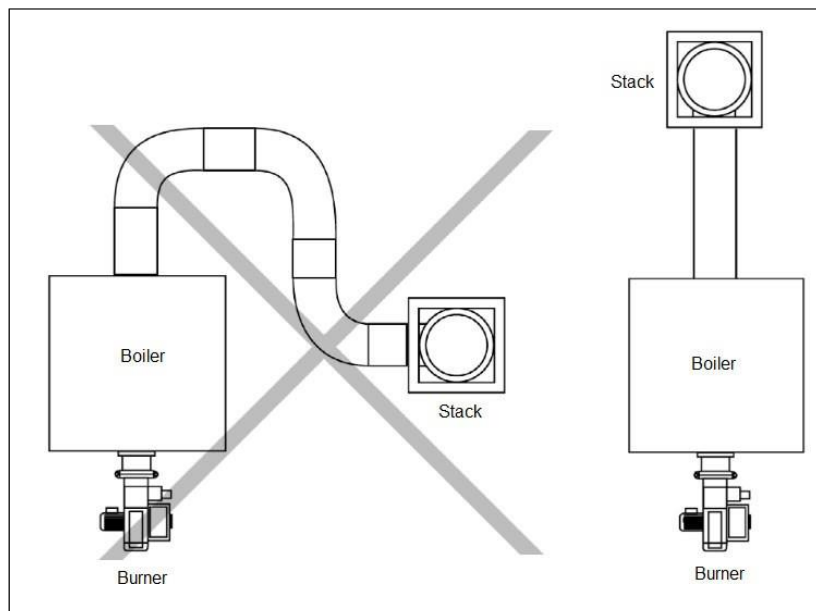


Рис. 11:
Пример неправильного (слева) и правильного (справа) отвода
дымовых газов от котла к
дымовой трубе [3]

- Переходы с увеличением поперечного сечения, а так же соединения между прямоугольными и круглыми воздуховодами должны выполняться без острых кромок.
- Угол раскрытия перехода не должен превышать 10° в случае уменьшения или увеличения поперечного сечения. Если выполнение этого условия не возможно, лучше расширяться скачком (90°) вместо расширения, например 30° .

Соединение дымохода с дымовой трубой

- Соединение дымохода с дымовой трубой должно выполняться под наиболее острым углом.
- В случае горелок с низким и верхним уровнем выброса NO_x соединение дымохода с дымовой трубой под углом $75...90^\circ$ не допускается.

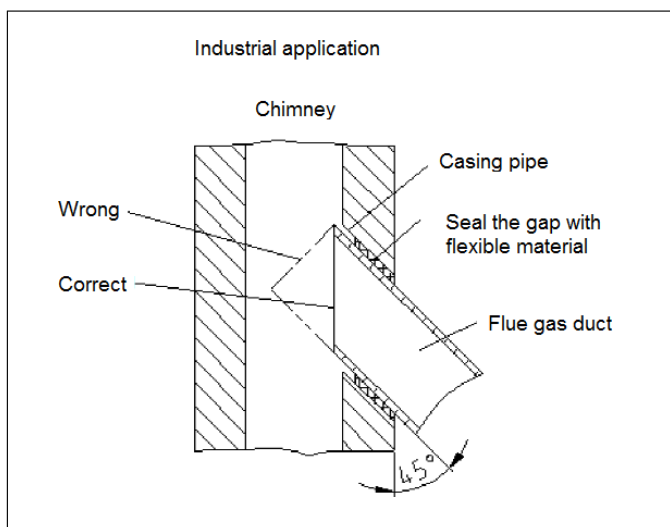


Рис. 12:
Соединение дымохода с дымовой трубой [3]

- Следует избегать соединений, расположенных напротив или на одной высоте, если дымовая труба используется более чем для одного дымохода.
- Устройство выходной части дымовой трубы должно быть устроено таким образом, чтобы был обеспечен свободный выход дымовых газов в окружающий воздух.

Дымовые трубы для множества дымоходов

- Несколько котлов могут быть одновременно подключены к общей дымовой трубе только в том случае, если можно гарантировать, что конструкция системы позволяет правильно отводить дымовые газы в любых условиях и при любой конфигурации работы этих котлов.
- Кроме того, необходимо предотвратить попадание дымовых газов в камеры сгорания неработающих котлов при работе с избыточным давлением, например за счет использования плотно закрывающихся заслонок дымовых газов.
- В каждом из подключенных котлов и во всем диапазоне нагрузок должны быть обеспечены условия постоянного противодавления в камере сгорания.

Внимание:

Подключение нескольких котлов к одной общей дымовой трубе, если принять во внимание вышеуказанные условия, в принципе, возможно. Однако, в случае если преимущественно работает только один котел, следует избегать множественных подключений - особенно если предполагается, что не все котлы будут работать одновременно.

На этапе проектирования необходимо точное понимание режима работы всех котлов.

Рассмотрение динамики потока в случае объединения потоков уходящих газов

Объединение потоков уходящих газов допускается для:

- Котлов с температурой дымовых газов $> 400^{\circ}\text{C}$.
- Систем сжигания сжиженного газа.
- Помещений котельных с установленными вентиляторами общеобменной вентиляции, за исключением случая, когда все котлы установлены в одном помещении.
- Камеры сгорания в помещениях с постоянной связью с окружающей средой - например, через вентиляционные отверстия. Исключая случай, когда котлы установлены в одном помещении.

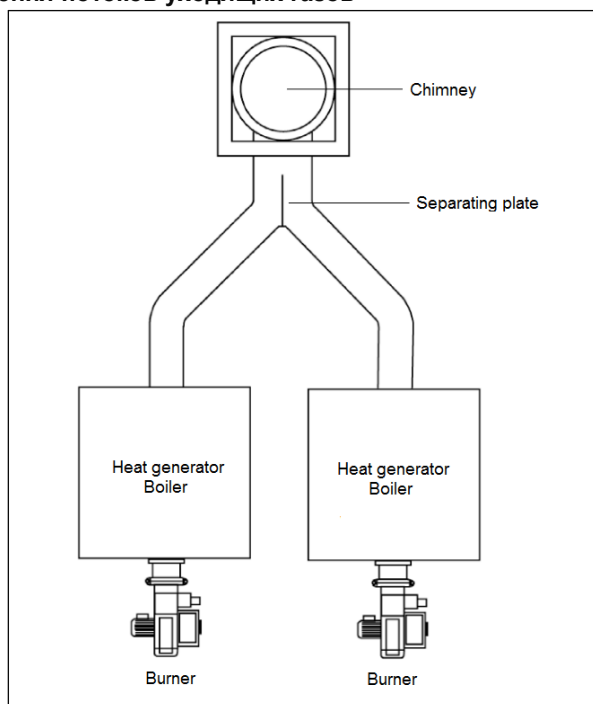


Рис.13: Объединение потоков уходящих дымовых газов в общую дымовую трубу [3]

2.2 Указания по проектированию

Принцип отсутствия вибрации

- Возникающие поперечные усилия и температурные расширения дымохода должны быть компенсированы путем установки компенсаторов или скользящих муфт.
- Воздуховоды круглого поперечного сечения наиболее предпочтительны для дымоходов из-за их лучшего показателя виброустойчивости.
- Подвесы или опоры для соединительных элементов должны быть предусмотрены в соответствии со статическим расчетом, при этом - в зависимости от использования компенсаторов - подвески и опоры могут быть жесткими, подпружиненными (с демпфирующим элементом) или выполненными в виде подшипников скольжения.
- Отводы дымовых газов необходимо надежно закрепить. Недостаточно подвесить воздуховоды с помощью вертикальных резьбовых стержней (шпилек) или аналогичных приспособлений. Собственная нагрузка конструкции, а также динамическая нагрузка воздушного потока, действующая на арматуру и монтажные детали, должны передаваться на опорную конструкцию и не приводить к разрушению.
- Вибрации воздуховодов уходящих газов в горизонтальном и в вертикальном направлении не допустимы.

Дополнительная информация

- Если элементы воздуховодов (прокладки, изоляция и тд.) способствуют накоплению конденсата, в соответствующих точках необходимо предусмотреть отвод сконденсированной влаги.
- Конденсат должен стекать по всей длине дымохода.
- Должны быть предусмотрены смотровые и измерительные отверстия, которые всегда должны быть легкодоступны.
- Должны быть предусмотрены точки подключения измерительных приборов для оценки параметров дымовых газов, и они должны быть легкодоступны.
- Дымоходы должны быть изолированы.

3 Возможные последствия при несоблюдении требований

Неправильно спроектированные системы подачи вторичного воздуха или уходящих дымовых газов могут вызвать ряд серьезных проблем, особенно в сочетании с уже существующей нестабильностью пламени, которая имеет место, особенно, в случае использования горелок с низким уровнем выбросов NOx. Последствиями этого являются высокие затраты на анализ первопричин, задержка ввода в эксплуатацию и дорогостоящие модификации.

В представленной таблице приведен краткий обзор возможных проблем, возникающих при сжигании топлива, причин, приведших к этому и соответствующих им ошибок при проектировании:

Проблема	Причина	Возможные ошибки при проектировании
Не удастся вывести горелку на номинальную мощность	Слишком высокие потери давления в системе воздуховодов	- Кол-во поворотов слишком велико - Повороты выполнены с острыми краями без использования направляющих пластин - Слишком много поворотов на коротком участке - Отсутствуют успокоительные участки - Неверно подобран вентилятор
Повышенные эксплуатационные и инвестиционные затраты	Нагнетатель переразмерен	Потери давления в воздуховодах и/или дымоходах котла значительно ниже ожидаемых
Повышенный аэродинамический шум	Скорость потока слишком высока	Неверно подобраны размеры воздуховодов
Пульсации, вибрации, скачки давления	Нестабильность пламени	- Отрыв потока и образование локальных вихрей в каналах - Перепады давления, возникающие в системе подачи вторичного воздуха, могут усиливаться нестабильным процессом горения - Низкий уровень жесткости конструкции воздуховодов
Повышенный уровень шума	Нестабильность пламени	Резонанс между колебаниями давления от нестабильного процесса горения и отрывом потока внутри системы подачи вторичного воздуха
Несимметричность факела	Неправильная подача топливо-воздушной смеси	- Резкий поворот воздуховода непосредственно на входе в горелку - Изменение поперечного сечения на входе в горелку - Отсутствуют направляющие пластины или успокоительные участки - Слишком низкая скорость потока, особенно в сочетании с неоднородностью воздушного потока

Табл. 2: Обзор возможных последствий и связанных причин

В случае сложной трассировки трубопровода, например:

- Исполнение нескольких двублочных горелок с одним нагнетателем
- Сложная прокладка воздуховодов с более чем 3-мя отклонениями в системе подачи вторичного воздуха или в дымоходе
- Сложная схема прокладки систем воздуховодов ввиду конструктивных ограничений

Рекомендуется применять CFD (Computational fluid dynamics) моделирование для обеспечения соответствия заявленным требованиям.

Команда ELCO будет рада проконсультировать вас и предоставить дополнительную информацию в случае проектирования сложной системы воздуховодов для подачи вторичного воздуха или уходящих газов.

Список источников

- [1] Walter, W.: *Lufttechnische Anlagen. Ventilatoren und Ventilatoranlagen*. 2. Auflage. Würzburg: Vogel- Buchverlag, 2007
- [2] Walter, W.: *Strömung und Druckverlust*. 7. Auflage. Würzburg: Vogel- Buchverlag, 2012
- [3] BDH: *Informationsblatt Nr. 32. Anforderungen an Abgasanlagen. für Feuerungsanlagen für flüssig und gasförmige Brennstoffe im Leistungsbereich von 1 bis 50 MW.*: https://www.bdh-koeln.de/fileadmin/user_upload/ISH2019/Infoblaetter/Infoblatt_Nr_32_Maerz_2011_Anforderungen_an_Abgasanlagen_fuer_Feuerungsanlagen_fuer_fluessige_und_gasfoermige_Brennstoffe_im_Leistungsbereich_von_1_bis_50_MW.pdf. Stand: März 2011
- [4] Schmidt, T.; Praetor, R.: *Präsentation IRATEC. Druckverlustbeiwerte unterschiedlich ausgeführter Umlenkungen mittels CFD- Simulation*