

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 8. С. 385–391
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 8, pp. 385–391

Научная статья

УДК 621.18

URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186018>

EDN: <https://www.elibrary.ru/TWQGGD>

Топочные процессы в котлах с инверсионной топкой

Е.М. Пузырев¹, Д.Е. Сурин^{2✉}, К.В. Маслов³, С.Н. Хуторненко⁴

^{1,3}ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», Барнаул, Российская Федерация

^{2,4}Барнаульское ОП ООО «Интер РАО – Инжиниринг», Барнаул, Российская Федерация

²surin-99@bk.ru✉

Аннотация. Рассмотрена U – образная компоновка котла с инверсионной компоновкой топки при потолочном расположении горелочных устройств и ее применение. Выполнено сравнение данного компоновочного решения с уже устоявшейся П – образной и другими компоновками топочной камеры котла. Выполнен анализ топочного процесса. Описан эффект внутритопочной рециркуляция дымовых газов в корень факела при инверсионной компоновке топки с потолочным расположением горелок. Проанализированы процессы шлакования и выгрузки золы в котлах с U – образная компоновкой. Дано описание применения данного компоновочного решения топки для сжигания угля и биотоплив, а также рассмотрена U – образная компоновка котла для блоков на ультрасверхкритических параметрах рабочего тела с выявлением ее преимуществ и недостатков.

Ключевые слова: U – образная компоновка, топочный процесс, инверсионная компоновка, оксиды азота, зола

Для цитирования. Пузырев Е.М., Сурин Д.Е., Маслов К.В., Хуторненко С.Н. Топочные процессы в котлах с инверсионной топкой // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 8. С. 385–391. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186018>

Original article

Furnace processes in boilers with inversion furnace

Е.М. Puzyrev¹, D.E. Surin^{2✉}, K.V. Maslov³, S.N. Khutornenko⁴

^{1,3}LLC “ProEnergoMash-Project”, Barnaul, Russian Federation

^{2,4}Barnaul OP LLC “Inter RAO – Engineering”, Barnaul, Russian Federation

²surin-99@bk.ru✉

Abstract. The layout of the boiler unit and its individual elements, especially the combustion chamber, implies the mutual arrangement of gas ducts and the placement of individual heating surfaces in them. There are several types of layouts known today, for example, two pass, T, U, N, tower and half-tower, and other types of boiler gas duct arrangement, each of which has a number of advantages and disadvantages.

For example, the two pass layout is the most popular. This allows you to get around the boiler's relatively small height. As a result, it is a simpler and cheaper boiler frame than the T – shaped layout.

The disadvantages of the two-pass arrangement are threefold rotation of combustion products: in the area of burner devices, as well as at the exit from the furnace and from the rotary gas duct.

The U – shaped boiler layout with an inversion furnace layout has a number of advantages over the two pass layout. U – shaped boilers have a low height. They differ favourably from other layouts in that the superheater is located at a low height, close to the height of the steam turbine, which also improves the installation and maintenance of the superheater. An additional advantage of this superheater is that in the event of slagging, the fall of slag deposits from the low-lying superheater tubes will not damage the heating surfaces.

The U – shaped boilers have another significant advantage, which is the minimum boiler area, as many elements are located on the top. This advantage makes it possible to increase the boiler output in comparison with the two pass, T – shaped layout with a comparable constructional area or, on the contrary, to reduce it with the same output.

When the burners are located on the furnace ceiling in the U – shaped arrangement, due to buoyancy forces, the burner jets, especially the twisted ones, suck a large amount of flue medium into the flame root, which reduces nitrogen oxide emissions.

An additional effect of the ceiling burner arrangement is that the furnace screens are better protected from flame buildup and, as a consequence, from slagging, with the accompanying stable heat perception of the furnace screens.

Keywords: U – shaped arrangement, furnace process, inversion arrangement, nitrogen oxides, ash

For citation. Puzyrev E.M., Surin D.E., Maslov K.V., Khutornenko S.N. Furnace processes in boilers with inversion furnace. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 8, pp. 385–391. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186018>

Введение

Компоновка котла и его отдельных элементов, особенно топочного устройства, подразумевает взаимное расположение газоходов и поверхностей нагрева, строится на рассмотрении достаточно большого количества, в том числе традиционных схем. В современном энергомашиностроении известны несколько типов компоновок. Типично они именуются по буквам с похожей формой, например, П, Т, U, N – образные, а также с башенной, полубашенной компоновкой и другими типами расположения газоходов котла.

Каждая из перечисленных компоновок имеет как ряд преимуществ, так и недостатков. Например, наиболее применяемая П – образная компоновка позволяет обойтись умеренной высотой котла. Дополнительным преимуществом является размещение тягодутьевых машин на нулевой отметке и удобное обслуживание горелок при их фронтальном расположении.

Недостатками П – образной компоновки является трехкратный поворот продуктов сгорания

в области горелочных устройств, а также на выходе из топки и из поворотного газохода. При этом каждый из поворотов усиливает неравномерность полей скоростей и концентрации золы. В области горелочных устройств возможен наброс факела на стены топки, что приводит к интенсификации шлакования экранных поверхностей, снижению их тепловосприятости и, как следствие, ограничению паропроизводительности котла. Попутно отметим, так как Т – образную компоновку котла можно представить, как объединение П – образной компоновки с такой же, но отраженной зеркально, то многие выделенные выше отрицательные моменты П – образных компоновок будут характерны и для Т – образной компоновки котлов.

Во втором верхнем, высокотемпературном повороте, за топкой формируются неравномерные распределения поля температур продуктов сгорания и концентрации частиц золы. Эти неравномерности также инициируют процессы шлакования ширм и последующих ступеней пароперегревателей, дают неравномерный перегрев

пара по ширине котла, который трудно скомпенсировать даже сложными в реализации схемами поперечного переброса пара между блоками пароперегревателя.

Третий поворот потока в конвективный газоход также создает эксплуатационные проблемы, которые связаны с неравномерным абразивным износом конвективных поверхностей нагрева, расположенных в нем. Вследствие инерционных сил потоки дымовых газов и зольных частиц устремляются к задней стенке газохода и далее перемещаются вдоль нее с высокой скоростью. При этом частицы золы вызывают интенсивный абразивный износ расположенных в этой зоне трубных пучков, особенно в их верхней части, так как согласно [1] интенсивность износа труб пропорциональна концентрации частиц и скорости потока в степени $1/0,3 \approx 3,3$.

U – образная компоновка котла

Расположение горелок в инверсионной компоновке может быть, как на стенах, так и на потолке топочной камеры [2].

При U – образной компоновке топки 1, рис. 1, наиболее эффективно расположение горелок 2 на потолке топки, поскольку отсутствие поворотов факела в верхней части топки обеспечивает его равномерное распределение по объему топочной камеры и в процессе движения вниз факел не взаимодействует с ограждающими поверхностями, минимизируя их шлакование.

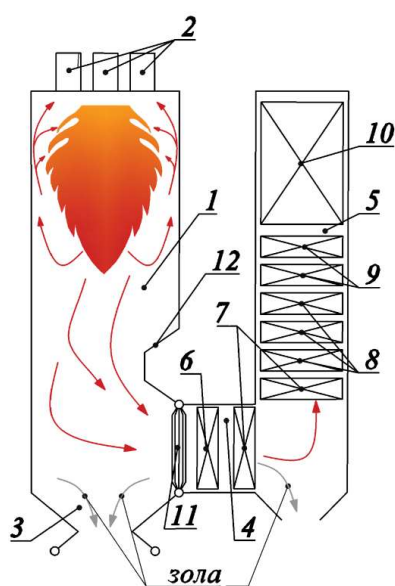


Рис. 1. Схема U – образной компоновки котла

При этом из-за действия сил плавучести наиболее нагретые газовые потоки за счет меньшей плотности стремятся вверх, навстречу нисходящему факелу, увеличивая свое время пребывания в топке, что улучшает их охлаждение и выравнивает поле скоростей в сечении топки. Различные эффекты от действия сил плавучести рассмотрены и даны в монографии [3].

Горелочные струи, особенно закрученные, индуцируют возврат топочных газов в прикорневую зону факела. При потолочном расположении горелок за счет сил плавучести наблюдаются дополнительные эффекты [4]. Из факела вверх, в его корневую зону, направляются наиболее нагретые потоки, что создает в районе горелок интенсивную внутритопочную рециркуляцию продуктов сгорания, как показано в упрощенном варианте применения одиночной горелки на рис. 2. Это повышает стабильность горения, тепловосприятия экранов и значительно снижает эмиссию оксидов азота без применения громоздкой в реализации внешней рециркуляции дымовых газов: достаточно перевода топки в режим ступенчатого сжигания. В итоге инверсионные схемы с U – образной компоновкой топочной камеры по сравнению с П – образной в значительной мере лишены многих недостатков, обеспечивают более эффективное охлаждение газов и создают возможность для значительного увеличения экологических и экономических характеристик котлов.

Кроме того, следует отметить, что силы плавучести создают в потоке газа моли с разнородной температурой, что интенсифицирует турбулентность и перемешивание [3] в горящей топливовоздушной смеси. Это, в свою очередь, обеспечивает полноту выгорания горючих компонентов при минимальном избытке воздуха и, соответственно, повышает экономичность котла.

Касаясь принципиальной схемы U – образной компоновки, рис. 1, также отметим, что холодная воронка 3 остается в нижней части, как и у котла с П – образной компоновкой, но здесь, благодаря чистоте топочных экранов, отсутствует риск накопления значительной массы шлаковых отложений, способных обрушиться с большой высотой в холодную воронку и нарушить работоспособность системы. Горизонтальный газоход 4 и конвективный газоход 5 «перевернуты», рис. 1, их входы находятся в нижней части кот-

ла, причем конвективный газоход 5 становится подъемным. В результате наиболее проблемные в эксплуатации, с точки зрения очистки от золовых отложений поверхности нагрева – ширмы, первичный и вторичный пароперегреватели – располагаются в более доступной зоне, непосредственно над системами золоудаления котла.

Холодные поверхности нагрева – экономайзер 9 и воздухоподогреватель 10 – расположены в верхней части газохода 5 и не требуют особого внимания при их обслуживании. Нижнее расположение образованного разводкой труб фестоны 11 под аэродинамическим выступом 12 также более благоприятно, чем при П – образной компоновке, что снижает склонность фестоны 11 к забиванию золовыми отложениями.

Касаясь проблемы абразивного износа, отметим, что, как показано стрелками на рис. 1, аэродинамический выступ отбрасывает поток дымовых газов в топке на фронтальный экран, и большая часть золы, до 50–80 %, выгружается сразу в первом повороте, при выходе дымовых газов из топки в горизонтальный газоход. Вследствие отклонения газов от заднего экрана топки к фронтальному экрану с помощью аэродинамического выступа, частицы направляются по наиболее протяженной траектории движения и прижимаются к нижней стенке горизонтального газохода, где частично осаждаются или улавливаются фестом 11. Благодаря этому этого поверхности нагрева 6 и 7, расположенные в горизонтальном газоходе, защищены от абразивного износа, что допускает применение шахматного расположения змеевиков для интенсификации конвективного теплообмена. Крупные фракции золы, осаждаются во втором повороте на входе в подъемный газоход. Расположение вторичного пароперегревателя 8, экономайзера 9 в подъемном газоходе увеличит их ресурс работы, т.к. золовые частицы движутся более равномерно в потоке дымовых газов и мало отклоняются к одной из сторон, как это происходит в П – образной компоновке при расположении экономайзера в конвективной шахте. Также стоит отметить, что частицы в восходящем потоке газа будут двигаться медленнее на величину удвоенной скорости витания, что дополнительно снижает интенсивность абразивного износа поверхностей 7–11 в подъемном газоходе.

Данная компоновка позволяет использовать самоопорную конструкцию котла, что даст возможность снизить металлоемкость каркаса водогрейного или прямоточного котла, рис. 2 [5].

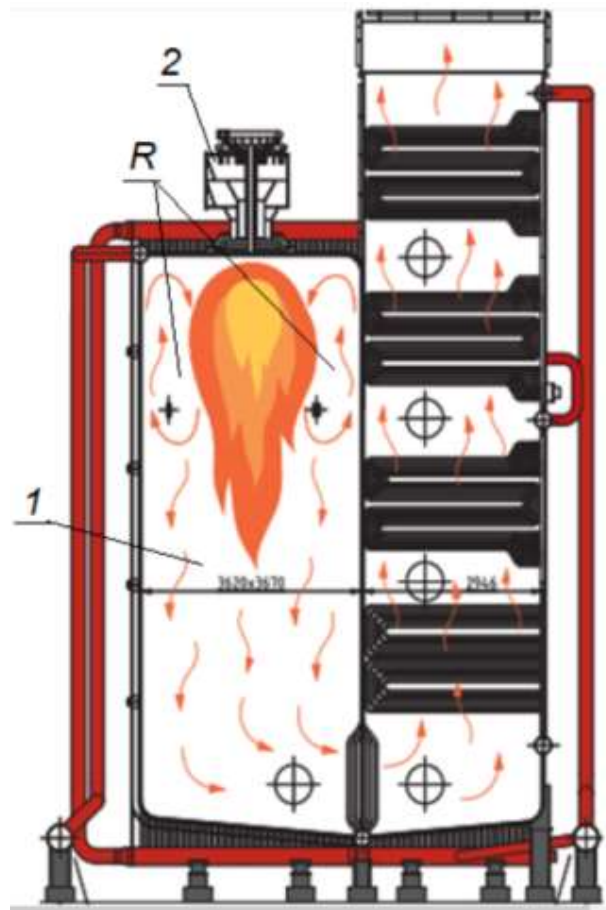


Рис. 2. Схема водогрейного газового котла с U – компоновкой

Благодаря потолочному расположению горелок в котле U – образной компоновки, факел отдален от стен, что создает возможность совместного сжигания с углем или вообще отдельно различные виды биотоплив. Наиболее важный вопрос при сжигании биотоплив – это интенсивное шлакование поверхностей нагрева котлов, прежде всего возгонами K_2O и прочими соединениями калия, а также других металлов щелочной группы [6]. Это важно, так как даже применение низкотемпературных схем [7] вихревого сжигания и сжигания в ЦКС не позволяет решить вопрос со шлакованием поверхностей нагрева биотопливных котлов.

На сегодняшний момент КПД тепловой электростанции с докритическими параметрами рабочего тела и промпарегревом составляет около

37 %. Применение котлов на сверхкритических (СКР) параметрах рабочего тела с промежуточным перегревом повышает КПД электростанции до уровня 41 %. Применение котлов, работающих на суперсверхкритических параметрах рабочего тела (ССКП), с промперегревом, при температуре первичного и вторичного пара 600 °C обеспечивает КПД цикла на уровне 44 %.

Для дальнейшего увеличения КПД электростанций требуется уже применение котлов с ультрасверхкритическими (УСКР) параметрами рабочего тела. При увеличении температура первичного и вторичного пара до 700 °C и давления до 35 МПа ожидается, что КПД тепловой электростанции превысит 48,5 % [8]. Однако повышение температуры первичного и вторичного пара до 700 °C требует внедрения материалов на основе сплава никеля, что более чем в 10 раз дороже материалов из легированной стали на основе железа. Применение энергоблоков с П, Т – образными компоновками для котлов на УСКР нецелесообразно, т.к. недостатком таких компоновок является большая протяженность паропроводов, соединяющих котел с паровой турбиной. Данная проблема возникает из-за большого высотного перепада выходных коллекторов пароперегревателя котла и входа в отсеки турбины. Применение башенной компоновки еще больше усугубляет данную проблему, т.к. пароперегреватель находится на еще большей высотной отметке, чем в П, Т – образных котлах.

Отметим, что это задача очень серьезная. На сегодня предлагаются даже такие технические решения, как поднять турбину до отметки выходных коллекторов пароперегревателей или с этой же целью заглубить котел в грунт на десятки метров. Существуют проекты с горизонтальной компоновкой котла, при расположении топки, пароперегревателей и конвективного захода на отметке машинного зала.

Котлы U – образной компоновки отличаются малой высотой. Они выгодно отличаются от прочих компоновок тем, что пароперегреватель находится на низкой высотной отметке, близкой к отметке паровой турбины, что также упрощает его монтаж и техническое обслуживание. Дополнительным преимуществом пароперегревателя, расположенного на низкой высоте, является снижение риска механических поврежде-

ний находящихся ниже поверхностей нагрева при обрушении шлаковых отложений.

Котлы U – образной компоновки обладают и другим существенным преимуществом, это минимальное пятно застройки котла, т.к. многие элементы расположены наверху. Данное преимущество позволяет увеличить мощность котла по сравнению с П, Т – образной компоновкой при сопоставимом пятне застройки или наоборот уменьшить его при идентичной мощности.

Кроме того, следует отметить, что в настоящее время в Китае разрабатываются и внедряются котлы U – образной компоновки на ультрасверхкритических параметрах рабочего тела с одним и двойным промежуточным перегревом, и это позволяет достичь КПД станции на уровне 48,5 % и 51 % [9].

Котлы похожей конструкции с плечевой топкой [10] были запатентованы и реализованы в СССР. Одним из таких котлов является ТП-230-3, работающий на промпродукте донецких углей.

U – образная компоновка также не лишена недостатков. При использовании угля в качестве основного топлива невозможно использовать систему пылеприготовления котла с шахтными сепараторами, затруднено будет и использование схем с прямым вдуванием. Системы с прямым вдуванием в данной компоновке имеют существенный недостаток, т.к. горелочные устройства расположены на потолке топочной камеры и пылепроводы получаются весьма длинными. Этот факт может привести к неравномерной подаче пыли в топку, а как итог – к пульсациям в топке и забиванию пылепроводов угольной пылью.

У системы пылеприготовления котла с промбункером и ПВКд(р) эти минусы отсутствуют. Основные элементы топливоподготовки располагаются на нулевой отметке. Пылевоздушная смесь после мельницы направляется в циклоны, пыль отделяется от сушильного агента и направляется в промбункер, находящийся под потолком здания, а сушильный агент сбрасывается в топочную камеру с помощью сбросных горелок. При таком расположении промбункера подача пыли к горелочным устройствам может осуществляться самотеком. Недостатки данной системы: они более дорогие, сложны по кон-

струкции и в эксплуатации, т.к. имеют дополнительные напорные вентиляторы.

Воздухоподогреватель в U – образной компоновке находится на одном уровне с горелочными устройствами, между ними минимальная длина воздухопроводов. По оценкам, можно использовать оба вида воздухоподогревателей, как регенеративные, типично роторные воздухоподогреватели (РВП), так и рекуперативные, трубчатые воздухоподогреватели (ВП).

Удаление газов при таком расположении из конвективной шахты сверху, поэтому тягодутьевые машины (ТДМ) и другие вспомогательные агрегаты могут быть также расположены наверху. Такое расположение ТДМ создает дополнительную статическую и динамическую нагрузку на каркас котла, но это легко решается на современном уровне техники.

Заключение

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать, что данная компоновка обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами компоновок, вобрав с каждой из них основные плюсы, хотя и не лишена недостатков.

Основное достоинство в данной компоновке – это уменьшенные длины паропроводов от выходных коллекторов пароперегревателя до входа в турбину, и это особенно важно в блоках на УСКР и ССКП.

Верхнее расположение горелок обеспечивает равномерное распределение факела по объему топки без контакта факела с ограждающими поверхностями, что позволяет сжигать разные виды топлив, включая шлакующие угли и даже биотоплива.

Дополнительно достоинством данной компоновки служит рециркуляция топочных газов в корень факела, появляющаяся из-за эффекта сил плавучести, что позволяет отказаться от дорогостоящего оборудования для создания этой рециркуляции с целью подавления эмиссии оксидов азота.

Стоит отметить, что данная компоновка универсальна, она пригодна для использования в котлах с естественной и принудительной циркуляцией, а также при сжигании различных топлив: углей, в том числе высокосольных, биотоплив и природного газа.

Список источников

1. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). СПб.: НПО ЦКТИ, 1998, с. 256.
2. Шварц А.Л., Вербоветский Э.Х., Сомова Е.В. и т.д. Разработка технических решений по пылеугольному котлу энергоблока 800 МВт на параметры пара 35 МПа, 700/720°C // Теплоэнергетика. 2015. № 12. С. 56–63. DOI: 10.1134/S0040363615120085. EDN: VCP0BV
3. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977. 431 с.
4. Дорошенко В.Е. (ред.). Горение и массообмен. М.: Машиностроение, 1985. 237 с.
5. TEMRON: Барнаул.
6. Пузырев Е.М., Голубев В.А., Пузырев М.Е. Технология «Торнадо» для энергетических котлов // Энергетические станции. Энергопрогресс. 2022. № 6. С. 12–18.
7. Zabetta E.C., Barisic V., Peltola K. et al. Foster Wheeler Experience with Biomass and Waste in CFBs // 33rd Clearwater Conference Clearwater, (2008). pp. 1–15.
8. Шварц А.Л., Сомова Е.В., Вербоветский Э.Х. и др. Прямоточный паровой котел на твердом топливе с инвертной топочной камерой для паротурбинного энергоблока ультрасверхкритических параметров пара. Патент RU 2601783 C1. Бюл. № 31, 10.11.2016.
9. Jiang M., Xiao P., Jiang J. et al. ARRANGEMENT STRUCTURE SUITABLE FOR INVERTED PULVERIZED COAL BOLER WITH ULTRA-HIGH STEAM TEMPERATURE STEAM PARAMETERS. The patent US 9.488,370 B2. 18.10.2012
10. Срывков С.В., Черняев В.И., Кузьмин А.В. и др. Факельно-вихревая экранированная топка. А.с. 486186А1 СССР, МПК F 23C 5/24. 23.08.1989.

References

1. *Thermal Calculation of Boilers (Normative Method)*. Saint Petersburg: NPO CKTI; 1998. 256 p. (In Russ.).
2. Shvarts AL, Verbovetsky EH, Somova EV et al. Development of technical solutions for the pulverised coal boiler of the 800 MW power unit for steam parameters 35 MPa, 700/720°C. *Teploenergetika*. 2015;12:56–63. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0040363615120085. EDN: VCP0BV
3. Turner J. *Buoyancy effects in fluids*. Moscow: Mir; 1977. 431 p. (In Russ.).
4. Doroshenko VE (ed.). *Combustion and Mass Transfer*. Moscow: Mashinostroenie; 1985. 237 p. (In Russ.).
5. TEMRON. Barnaul. (In Russ.).
6. Puzyrev EM, Golubev VA, Puzyrev ME. Technology «Tornado» for power boilers. *Power stations. Energoprogress*. 2022;(6):12–18. (In Russ.).
7. Zabetta EC, Barisic V, Peltola K et al. Foster Wheeler Experience with Biomass and Waste in CFBs // 33rd Clearwater Conference Clearwater (2008). pp. 1–15.
8. Shvarts AL, Somova EV, Verbovetsky EH et al. *Direct-flow solid fuel steam boiler with inverted furnace chamber for steam turbine power unit of ultrasupercritical steam*

- parameters*. Patent No. RU 2601783 C1. 10.11.2016. (In Russ.).
9. Jiang M, Xiao P, Jiang J et al. *ARRANGEMENT STRUCTURE SUITABLE FOR INVERTED PULVERIZED COAL BOILER WITH ULTRA-HIGH STEAM TEMPERATURE STEAM PARAMETERS*. Patent No. US 9,488,370 B2. 18.10.2012.
10. Strykov SV, Chernyaev VI, Kuzmin AV et al. *Torch-vortex shielded furnace*. A.s. 486186 A1 USSR, MPK F 23C 5/24. 23.08.1989. (In Russ.).