

Исследование эффективности работы турбированного котла на газовом топливе

Рецензия эксперта на статью получена 07.03.2026 [The expert review of the article was received on March 7, 2026]

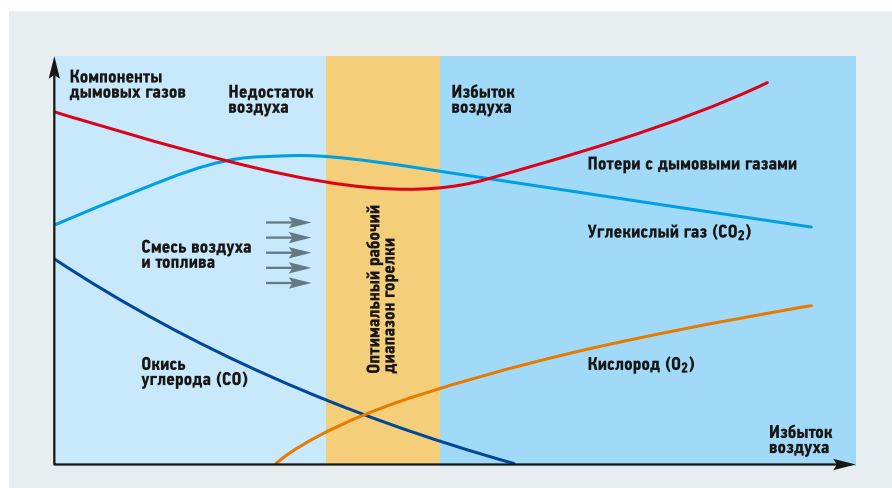


Рис. 1. Влияние коэффициента избытка воздуха на параметры дымовых газов

Газовое оборудование, на базе которого создаются автономные отопительные системы, в настоящее время представлено на рынке двумя основными типами: атмосферными (конвекционными) и турбированными котлами.

Атмосферный газовый котёл забирает воздух, необходимый для горения, непосредственно из помещения котельной. Вывод продуктов сгорания осуществляется через дымоход за счёт естественной тяги. В турбированном котле предусмотрена закрытая камера сгорания. Воздух поступает в камеру сгорания за счёт работы вытяжного вентилятора (дымососа), который одновременно удаляет дымовые газы, образующиеся в результате сжигания топлива. Подача воздуха и удаление дымовых газов могут быть организованы через коаксиальный дымоход или посредством раздельной подачи приточного воздуха и удаления уходящих газов.

Современные котлы конструируются с учётом типов горелок и определённого типа топлива. Используются модулируемые устройства, точно настроенные с учётом требуемой тепловой нагрузки,

а следовательно, варьирующие подачу топлива и окислителя (воздуха) для бесступенчатого регулирования мощности нагревателя. По этой причине в последних разработках производителей котельного оборудования в основном используют горелки полного предварительного смешения, в которых для подачи воздуха на горение дополнительно используется разрежение в топке (закрытая топка). Такие горелки не только обеспечивают более высокий КПД котлоагрегата, но и способны поддерживать устойчивое горение в широком диапазоне от 30 до 100 % номинальной мощности [1].

Максимально эффективная работа котлового агрегата, в том числе с точки зрения экологичности, возможна только при полном сгорании топлива.

Ключевым условием такой работы является поддержание требуемого соотношения «газ/воздух» в горелочном устройстве. Отметим, что оптимальное значение коэффициента избытка воздуха для всех типов горелочных устройств находится в эксплуатационном диапазоне $\lambda = 1,05 - 1,25$ (рис. 1).

УДК 62-69. Научная специальность: 2.4.5.

Исследование эффективности работы турбированного котла на газовом топливе

Евгений Валерьевич Кочарян, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики и теплотехники, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ, г. Краснодар); **Александр Викторович Шкуркин**, инженер, ООО «Термотехника Энгельс» (г. Энгельс); **Никита Андреевич Шелест**, аспирант, КубГТУ (г. Краснодар)

В работе проведено исследование эффективности работы турбированного котла, работающего на природном газе, в зависимости от аэродинамического сопротивления канала для отвода продуктов сгорания. Представлены результаты экспериментальной оценки коэффициента местного сопротивления диафрагм на тракте уходящих газов, напорной характеристики вентилятора котла Viessmann Vitopend 100, а также эффективности работы котлоагрегата в разных режимах. Получено подтверждение эффективности использования диафрагм уходящих газов для настройки совместной работы вентилятора котла и газоотводящего тракта. Показано, что установка диафрагм является необходимым, но недостаточным инструментом регулирования оптимального соотношения «газ/воздух» в горелочном устройстве.

Ключевые слова: газовый котёл, сжигание, диафрагма, гидравлическое сопротивление, эффективность.

UDC 62-69. Scientific specialty number: 2.4.5.

Investigation of the efficiency of a gas-fired turbocharged boiler

Evgeniy V. Kocharyan, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Thermal Power Engineering and Heat Engineering, Kuban State Technological University (KubSTU, Krasnodar city); **Alexander V. Shkurkin**, engineer, "Thermotechnika Engels", LLC (Engels city); **Nikita An. Shelest**, postgraduate student, KubSTU (Krasnodar city)

The study of the efficiency of a turbocharged boiler running on natural gas, depending on the aerodynamic resistance of the channel for the discharge of combustion products. The results of an experimental evaluation of the local resistance coefficient of the diaphragms on the exhaust gas path, the pressure characteristics of the Viessmann Vitopend 100 boiler fan, as well as the efficiency of the boiler unit in different modes are presented. Confirmation of the effectiveness of using exhaust gas diaphragms to adjust the joint operation of the boiler fan and the exhaust duct has been obtained. It is shown that the installation of diaphragms is a necessary but insufficient tool for regulating the optimal gas/air ratio in the burner device. The research was carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation within the framework of the scientific project N-25.1/38.

Key words: gas boiler, combustion, diaphragm, hydraulic resistance, efficiency.

Значение коэффициента избытка воздуха на работающем теплогенераторе может быть определено на основании результатов газового анализа продуктов сгорания по процентному содержанию в них кислорода O_2 или углекислого газа CO_2 [2]. Разбавление продуктов сгорания избыточным воздухом (с ростом λ) приводит к снижению теоретической температуры горения топлива и, следовательно, к снижению интенсивности теплообмена в топке теплогенератора, а также к увеличению объёма продуктов сгорания и, как следствие, к росту потерь теплоты с уходящими газами q_2 . Поэтому оправдано стремление поддерживать минимально допустимые значения коэффициента избытка воздуха.

Таким образом, оптимальная работа котлоагрегата может быть достигнута согласованной работой вытяжного вентилятора и газового клапана котла в автоматическом режиме, управляемом контроллером (микропроцессором) на основе пользовательских установок и импульсов встроенных датчиков давления и температуры. Панель управления позволяет включать и выключать вентилятор, а также задавать обороты вентилятора (мощность надува) на каждой из стадий работы отопительного котла. Однако производительность вентилятора определяется в первую очередь сочетанием его напорной характеристики и гидравлической характеристики системы «воздуховод — дымоход» (то есть рабочей точкой). Рассмотрим работу вентилятора на примере модели FIME VGR0020991 42W (используется для котлов Viessmann Vitopend 100).

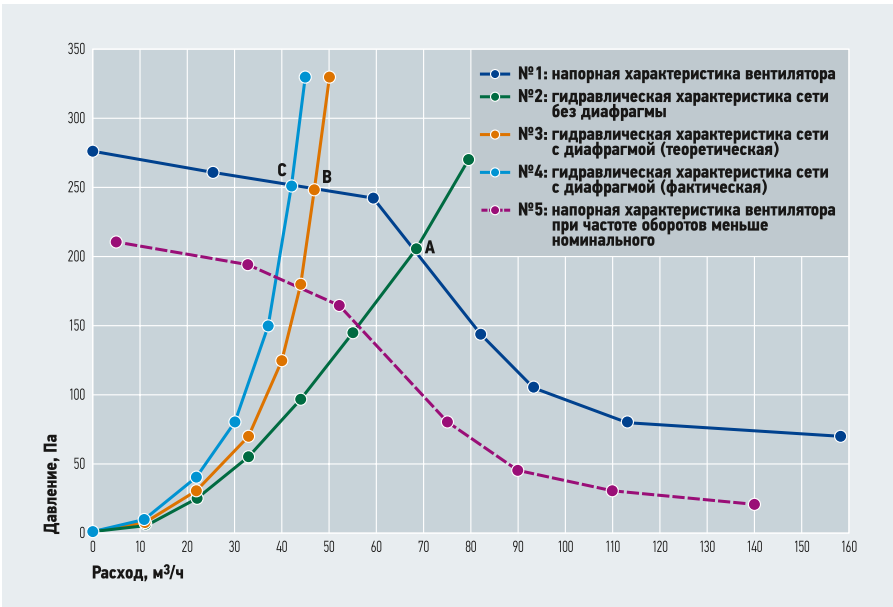


Рис. 2. Напорная характеристика вытяжного вентилятора FIME VGR0020991 42W

Напорная характеристика вентилятора получена авторами в ходе натурных экспериментов самостоятельно (кривая 1 на рис. 2), так как производитель не размещает данную информацию в открытых источниках.

Действительные значения расхода газозвдушной смеси и давления, развиваемого вентилятором, определяются рабочей точкой — точкой пересечения напорной характеристики вентилятора и характеристики сети (кривые 2, 3, 4). В зависимости от сопротивления газозвдушного тракта рабочая точка может смещаться (точки A, B и C), и объём воздуха, поступающего на горение, также будет изменяться. Влияние этого факта оценим экспериментально на примере газового котла Viessmann Vitopend 100-W номинальной мощностью 24 кВт.

Подвод воздуха и отвод продуктов сгорания организован отдельно через адаптер с воздуховодами диаметром 80 мм. Котёл работает на сетевом природном газе. Основные характеристики котлоагрегата [3] приведены в табл. 1.

Оптимальная работа котлоагрегата может быть достигнута согласованной работой вытяжного вентилятора и газового клапана котла в автоматическом режиме, управляемом контроллером на основе пользовательских установок и импульсов встроенных датчиков давления и температуры. Панель управления позволяет включать и выключать вентилятор, а также задавать его обороты

Характеристики котла Viessmann Vitopend 100-W (24 кВт)

табл. 1

Параметр	Значение
Номинальная тепловая мощность, кВт	24
КПД при 100/30 %-ной загрузке, %	91/83
Расход газа при максимальной мощности (топливо — природный газ), м³/ч	2,77
Динамическое давление газа, кПа	1,3/2,0
Температура теплоносителя (min/max), °C	40/80

Протокол результатов измерений (первый режим)

табл. 2

Параметр	При тепловой нагрузке 85 %		При тепловой нагрузке 40 %	
	Режим первый	Режим второй	Режим первый	Режим второй
$q_{A_{\text{net}}}$, %	12,7	6,1	18,4	9,1
λ	3,0	1,84	6,36	4,38
O_2 , %	14,0	9,6	17,7	16,2
CO, ppm	23	36	24	23
нCO, ppm	69	66	153	101
$T_{\text{дг}}$, °C	144,9	112,6	109	82,8
КПД _ф , %	87,3	93,9	81,6	90,9
$T_{\text{атм}}$, °C	20,8	20,8	21,0	20,9
CO ₂ , %	3,97	6,46	1,87	2,72

В режиме работы на ГВС (первый режим) фактический расход воздуха на горение составляет 68,4 м³/ч (данные получены расчётом с учётом измеренного расхода газа и коэффициента избытка воздуха). Расход газа по данным стационарного газового счётчика составляет 2,4 м³/ч. Температура воды на входе в котёл 10 °C, на выходе — 49 °C. Фактическая тепловая мощность 20,3 кВт, то есть тепловая нагрузка составляет около 85 %. Результаты эффективности работы котлоагрегата, полученные с использованием газоанализатора Testo 320, при данной нагрузке, а также при нагрузке 40 % приведены в табл. 2.

При этом для тепловой нагрузки 85 % теоретически необходимый расход воздуха на горение равен 25 м³/ч (с коэффициентом избытка воздуха $\lambda = 1,1$).



Рис. 3. Комплект диафрагм уходящих газов для котла Viessmann Vitopend 100-W

Очевидно, что завышенный расход воздуха приводит к значительным потерям с уходящими газами и существенному снижению КПД относительно паспортных значений КПД (в данном случае под КПД будем понимать коэффициент использования топлива, поскольку потери энергии в окружающую среду от корпуса котлоагрегата не учитывались). Основная причина повышенного расхода воздуха — это низкое аэродинамическое сопротивление системы «воздуховод — дымоход» (ориентировочно его значение из рис. 2 можно оценить в 210 Па).

Ввиду того, что характеристики дымового тракта сугубо индивидуальны, производитель оборудования рекомендует при монтаже подстраивать гидравлическое сопротивление дымового тракта под характеристики нагнетателя путём установки диафрагмы на тракте уходящих газов (рис. 3). Диафрагма сужает проходное сечение газохода и играет роль дроссельной шайбы, то есть искусственного местного сопротивления, которое делает характеристику сети более крутой (кривая 3 на рис. 2).

Для рассматриваемого случая (совокупная длина воздуховода и дымохода менее 12 м) производитель рекомендует диафрагму с диаметром сечения 41 мм. При этом в документах завода-изготовителя не приводятся ни коэффициенты местных сопротивлений сужающих устройств, ни потери давления на них. Экспериментальная проверка величины местного сопротивления диафрагм, выполненная в ходе данной работы, дала значения, приведённые в табл. 3. Измерения сопротивления

диафрагмы проводились для воздуха при температуре 20°C и давлении 101,1 кПа (табл. 3). Контроль перепада давления на испытательном стенде осуществлялся с помощью дифманометра Testo 510, скорость и температура воздуха измерялись анемометром Testo 410-1.

В том случае, если бы на котле было предусмотрено частотное регулирование работы вентилятора (в зависимости от аэродинамического сопротивления дымового тракта), напорная характеристика могла бы смещаться вниз (пунктирная линия 5 на рис. 2), и подача вентилятора снижалась бы в соответствии с частотой вращения согласно теории подобия и законам пропорциональности нагнетателей [4]:

$$G_{\text{вент1}}/G_{\text{вент2}} = n_1/n_2, \quad (1)$$

где $G_{\text{вент1}}$ и $G_{\text{вент2}}$ — подача вентилятора, м³/ч; n_1 и n_2 — частота вращения рабочего колеса вентилятора, об/мин.

При этом расхождение между требуемой и фактической рабочей точкой также уменьшалось бы.

Установка диафрагмы Ду 41 мм на газоходе котла (в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя [3] при раздельной подаче приточного воздуха и отводе уходящих газов, а также длине системы удаления продуктов сгорания, не превышающей 12 м) позволяет сместить рабочую точку (точка С на рис. 2) и снизить расход воздуха до 41,9 м³/ч. Результаты эффективности работы котлоагрегата, работающем в новом режиме (с установленной диафрагмой), приведены в табл. 2.

На рис. 2 кривые 2, 3 и 4 отображают гидравлические характеристики газо-

воздушного тракта котла без диафрагмы и с диафрагмой (расчётная и фактическая для тепловой нагрузки 85%). Из рис. 2 видно, что рабочие точки А и В определяют значение подачи воздуха на горение — 68,4 и 41,9 м³/ч, соответственно. То есть использование диафрагмы приводит к смещению рабочей точки и снижению расхода.

Расчётное снижение расхода составляет 20,5 м³/ч или 30%, а фактическое — 26,5 м³/ч или 38,7% (точка С). Снижение расхода воздуха приводит к уменьшению потерь с уходящими газами и росту КПД на 6,6 и 9,3% (для тепловой нагрузки 85 и 40%, соответственно).

Установка диафрагм в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя однозначно приводит к повышению эффективности котлоагрегата и соответствующему снижению расхода топлива

Из анализа результатов измерений можно сделать следующие выводы: установка диафрагм в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя однозначно приводит к повышению эффективности котлоагрегата и соответствующему снижению расхода топлива. Однако очевидно, что, несмотря на это, достигнутое снижение расхода воздуха недостаточно и не обеспечивает оптимальное соотношение «газ/воздух» в горелочном устройстве. Поэтому котлы со ступенчатым регулированием скорости работы вентилятора или программируемым частотным регулированием, обеспечивающим более точную настройку режима его работы под конкретную систему дымоудаления, будут более энергоэффективны при прочих равных условиях.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта №Н-25.1/38.

Характеристики диафрагм уходящих газов

табл. 3

Тип диафрагмы	Величина коэффициента местного сопротивления
Диафрагма Ду 41	2,24
Диафрагма Ду 46	1,24
Диафрагма Ду 47	0,96
Диафрагма Ду 50	0,33

1. Хаванов П.А. Атмосферные газовые горелки автономных теплогенераторов // АВОК, 2003. №1. С. 54–61.
2. Измерительные технологии для систем отопления. Советы и рекомендации: практическое руководство [Электр. ресурс]. Testo, 2018. Режим доступа: testospb.ru. Дата обращ.: 10.02.2026.
3. Инструкция по монтажу и сервисному обслуживанию котла Viessmann Vitopend 100-W (тип A1NB, A1JB) от 12 до 34 кВт [Электр. ресурс]. Режим доступа: c-o-k.ru. Дата обращ.: 05.02.2026.
4. Кочарян Е.В., Андрейко Н.Г. Нагнетатели и тепловые двигатели: учеб. пособие. — Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2024. 220 с.

References — see page 78.

[Investigation of the efficiency of a gas-fired turbocharged boiler. Pp. 33–35.](#)

Evgeni V. Kocharyan, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Thermal Power Engineering and Heat Engineering, Kuban State Technological University (KubSTU, Krasnodar city); **Alexander V. Shkurkin**, engineer, "Thermotechnika Engels", LLC (Engels city); **Nikita An. Shelest**, postgraduate student, KubSTU (Krasnodar city)

1. P.A. Khavanov. *Atmosfernye gazovye gorelki avtonomnykh teplogeneratorov* [Atmospheric gas burners of autonomous heat generators]. *AVOK* [Journal of the Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics (ABOK)]. 2003. No. 1. Pp. 54–61. [In Russian]
2. *Izmeritel'nye tekhnologii dlya sistem otopeniya. Sovety i rekomendatsii: Prakticheskoe rukovodstvo* [Measuring technologies for heating systems. Tips and recommendations: The practical guide]. *Testo*. 2018. Web-source: testo-spb.ru. Access date: February 10, 2026. [In Russian]
3. *Instruktsiya po montazhu i servisnomu obsluzhivaniyu kotla Viessmann Vitopend 100-W (tip A1KhB, A1JB) ot 12 do 34 kVt* [Installation and service instructions for the Viessmann Vitopend 100-W boiler (type A1HB, A1JB) from 12 to 34 kW]. Web-source: c-o-k.ru. Access date: February 5, 2026. [In Russian]
4. E.V. Kocharyan, N.G. Andrejko. *Nagnetateli i teplovye dvigateli: ucheb. posobie* [Blowers and heat engines: A textbook]. Krasnodar. *Izd-vo KubGTU* [Publishing House of the Kuban State Technological University]. 2024. 220 p. [In Russian]