

# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER

УДК 628.81

DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.4

## Настенный газовый конвекционный котел с атмосферной горелкой двойной модуляции

Алексей Леонидович Торопов

Инженерный центр «Апрель»; г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Для отопления квартир требуется тепловая мощность не более 1,0–2,5 кВт, для подготовки горячей воды 15–25 кВт. Конвекционные газовые котлы не могут обеспечить эффективную работу в диапазоне изменения плавной модуляции в 20 раз. В режиме «отопление» их работа переходит в дискретную модуляцию, сопровождающуюся значительным повышением выбросов парниковых газов и резким снижением энергетической эффективности. Для теплоснабжения таких помещений нужны теплогенераторы, работающие в двух диапазонах тепловой мощности.

**Материалы и методы.** Исследовалась работа настенного конвекционного газового котла с атмосферной горелкой с трехсекционным коллектором, обеспечивающим работу в режиме «отопление» в диапазоне плавной модуляции 2,4–6 кВт и в режиме горячего водоснабжения (ГВС) с модуляцией мощности 15–24 кВт.

**Результаты.** Получены графики КПД работы котла в режимах «отопление» и «ГВС» для установившихся режимов работы и в режимах дискретной модуляции с постоянным чередованием включения-выключения котла. Определены показатели энергетической эффективности проводилось прямым способом с фиксацией расхода газа, теплоносителя, температур на входе и выходе в котел.

**Выводы.** Применение традиционных конвекционных настенных газовых котлов для теплоснабжения при размерах помещений до 60 м<sup>2</sup> приводит к работе котлов в режиме дискретной модуляции тепловой мощности, которая сопровождается значительным снижением энергетической эффективности системы теплоснабжения и повышенными выбросами парниковых газов. Использование показателей эффективности при установившихся режимах работы котлов не соответствует реальному режиму работы котла в отопительный период и является значительно завышенным. Применение для поквартирного теплоснабжения настенных конвекционных котлов с атмосферной горелкой с двумя диапазонами плавной модуляции тепловой мощности позволяет использовать их с высокой эффективностью.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** газовый настенный котел, энергетическая эффективность, атмосферная горелка, модуляция, парниковые газы, экология

**Благодарности.** Автор благодарит рецензентов за замечания, способствующие более глубокому раскрытию темы научной работы.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Торопов А. Л. Настенный газовый конвекционный котел с атмосферной горелкой двойной модуляции // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.4

Автор, ответственный за переписку: Алексей Леонидович Торопов, [toropov@aprilgroup.ru](mailto:toropov@aprilgroup.ru).

## A wall-mounted gas convection boiler with an atmospheric burner operating in the double modulation mode

Alexey L. Toropov

Engineering Center "April"; Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Apartment heating requires the thermal capacity of no more than 1.0–2.5 kW; hot water preparation needs 15–25 kW. Convection gas boilers cannot operate efficiently, if a change in the range of smooth modulation reaches 20 times. Discrete modulation is triggered in the heating mode, which is also accompanied by a substantial increase in greenhouse gas emissions and a sharp decline in energy efficiency. The heating of such premises requires heat generators operating in the two ranges of thermal capacity.

**Materials and methods.** The author analyzes the operation of a wall-mounted convection gas boiler with an atmospheric burner equipped with a three-section manifold that ensures a smooth modulation range of 2.4–6 kW, when the boiler is in the heating mode, and the modulation range of 15–24 kW, when the boiler is in the hot water supply mode (HWS).

**Results.** The author made boiler efficiency diagrams for the heating and HWS modes during the steady boiler operation; the author also made boiler diagrams for discrete modulation modes and the regular on-off switching of the boiler. A direct method, that entailed the study of the flow rates of gas and heat conductor, as well as the boiler inlet and outlet temperatures, was employed to find the energy efficiency values.

**Conclusions.** The use of conventional wall-mounted gas convection boilers as a source of heating for the 60 m<sup>2</sup> premises entails discrete capacity modulation, that causes a substantial reduction in the energy efficiency of a heating system and rises greenhouse gas emissions. The application of efficiency indicators to different modes of operation of boilers does not convey the real mode of operation of a boiler during the heating period, since it entails a substantial overestimation, while wall-mounted convection boilers, having atmospheric burners with two ranges of smooth modulation, ensure highly efficient apartment heating.

**KEYWORDS:** wall-mounted gas boiler, energy efficiency, atmospheric burner, modulation, greenhouse gases, ecology

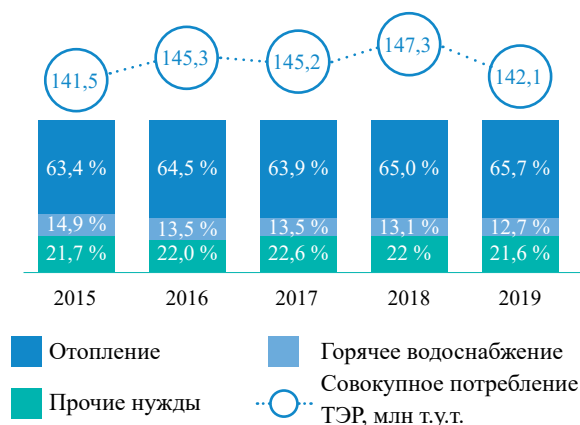
**Acknowledgements.** The author thanks the reviewers for their comments, contributing to a deeper exploration of the research topic.

**FOR CITATION:** Toropov A.L. A wall-mounted gas convection boiler with an atmospheric burner operating in the double modulation mode. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2022; 12(2):4. URL: <http://nsso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.4

**Corresponding author:** Alexey L. Toropov, [toropov@aprilgroup.ru](mailto:toropov@aprilgroup.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Комфортные условия жизни — одна из главных потребностей человека. Системы отопления и подготовки горячей воды являются основным инструментом, позволяющим создать и поддерживать температурно-влажностный, гигиенический режимы в местах нахождения людей. За последнее столетие заметно возросло влияние на естественную природную среду техногенных факторов и негативные последствия данного воздействия формируют угрозы и риски дальнейшего развития человечества. Часть факторов, связанных с этим, касаются повышения содержания парниковых газов в атмосфере Земли. Создание искусственной среды обитания, темпы роста сжигания углеводородного топлива для обеспечения некоторых возросших потребностей человека приводят к значительному выбросу двуокиси углерода и окислов азота. Более 65 % всего потребления энергии населением приходится на отопление, 13 % на горячее водоснабжение. Совокупное потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и их распределение представлено на рис. 1<sup>1</sup>.



**Рис. 1.** Распределение энергетических ресурсов в потреблении человека

<sup>1</sup> Государственный доклад «О состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации» // Министерство экономического развития Российской Федерации. М., 2020. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c3901dba442f8e361d68bc019d7ee83f/Energyefficiency2020.pdf>

В странах Европейского союза (ЕС) доля потребления энергии в жилом секторе в общем энергобалансе зданий составляет 70 % на отопление и 14 % на горячее водоснабжение (ГВС) [1]. Все передовые государства уделяют внимание повышению энергоэффективности зданий и систем теплоснабжения. Снижение выбросов парниковых газов, сопровождающих работу тепловых агрегатов систем теплоснабжения, — государственная задача, выполнение которой контролируется органами власти<sup>2, 3, 4</sup>.

В течение последних пятнадцати лет в РФ развивается автономное теплоснабжение для многоквартирных многоэтажных домов (поквартирное теплоснабжение). Основным источником тепловой энергии в них служат двухконтурные настенные газовые котлы, общее количество которых составляет около трех миллионов штук. Выбору схем работы данных систем отопления, технико-экономическому и экологическому анализу уделяется большое внимание [2]. Сравнение воздействия на окружающую среду систем централизованного и децентрализованного теплоснабжения представлено в работах [3–5].

При использовании настенных газовых котлов для автономного теплоснабжения помещений, независимо от районов размещения объектов, выбор делается в пользу конденсационной техники [6–12].

В публикациях [13–15] представлены сведения о влиянии разных факторов на повышение энергоэффективности зданий и снижение выбросов парниковых газов при использовании теплогенераторов на основе традиционных видов топлива. Исследования проведены для Великобритании, Норвегии

<sup>2</sup> Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings. Strasbourg (France). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0031>

<sup>3</sup> World energy balances 2020 edition. Database documentation. URL: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/4f314df4-8c60-4e48-9f36-bfea3d2b7fd5/WorldBAL\\_2020\\_Documentation.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/4f314df4-8c60-4e48-9f36-bfea3d2b7fd5/WorldBAL_2020_Documentation.pdf)

<sup>4</sup> Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ. URL: <https://fzakon.ru/laws/federalnyy-zakon-ot-23.11.2009-n-261-fz/>

и Германии. Согласно представленным материалам, наиболее эффективной мерой повышения энергоэффективности зданий с автономной системой теплоснабжения является повышение теплоизоляции стен, снижающее годовое потребление газа на 10,5 % и годовое потребление электроэнергии на 8 %. Установка нового энергоэффективного (конденсационного) котельного оборудования сокращает потребление газа на 4,1 % и электроэнергии на 5,2 %. Учитывая, что климат в рассмотренных странах во многом совпадает с климатом отдельных районов РФ, эти исследования с большой долей достоверности можно применить к территории России. Наиболее эффективный способ увеличения энергоэффективности зданий — комбинация дополнительной теплоизоляции ограждающих конструкций и применение современного котельного оборудования.

В нормативных актах РФ относительно типа теплогенератора для автономных систем теплоснабжения нет запрета на конвекционные настенные газовые котлы. Доля использования котлов данного типа в «поквартирном теплоснабжении» составляет 98 % [16]. В настоящее время и на ближайшую перспективу до 10 лет, учитывая, что срок службы этих котлов составляет около семи лет, их доля не снизится ниже 90 %. Проблема использования конвекционных настенных котлов связана с тем, что один котел применяется и для отопления, и для ГВС квартиры. Потребление тепловой энергии для обеспечения ГВС в соответствии с санитарными нормами требует не менее 15 кВт/ч. А комфортный уровень потребления ГВС квартиры с двумя точками разбора — наличия теплогенератора с тепловой мощностью не менее 24 кВт/ч. Расходы тепловой мощности для отопления маломерных квартир в многоквартирных домах даже в экстремально холодные периоды отопительного сезона не превышают 2,5 кВт/ч, а среднее значение отмечается до 1,3 кВт/ч [17]. Таким образом, диапазон изменения тепловой мощности при использовании одного теплогенератора для отопления и ГВС должен составлять более 20 раз. Конвекционные настенные котлы с атмосферными многофакельными горелками имеют диапазон непрерывной модуляции не более 2,5 раза [18, 19]. Конденсационные настенные котлы обладают диапазоном устойчивой плавной модуляции не более 7 раз. Ни конденсационные настенные котлы, ни конвекционные котлы не способны обеспечить работу с плавной модуляцией мощности во всем диапазоне тепловой нагрузки системы теплоснабжения (отопление + ГВС). При работе в режиме «отопление» их работа переходит в режим дискретной модуляции — постоянного чередования включения-выключения горелки котла со значительными выбросами продуктов сгорания, соответствующих неуставившимся режимам работы. Необходимо исключить работу котла для отопления помещения в режиме дискретной моду-

ляции. Для этого предлагается создать настенный газовый котел, оснащенный двухступенчатой горелкой.

Цель исследования — изучение параметров работы настенного газового котла для автономных систем теплоснабжения маломерных квартир с газовой горелкой, работающей в зоне плавной модуляции, как для режима отопления помещений, так и для подготовки горячей воды.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Лабораторные исследования

Объект изучения — двухконтурный экспериментальный настенный газовый котел «Ардерия D24». Использована газовая атмосферная многофакельная горелка с одиннадцатью форсунками. Коллектор горелки разделен на три зоны. Центральная, состоящая из трех форсунок, две — боковые, по четыре форсунки с каждой стороны (Патент RU 203004). Центральная зона предназначена для работы котла в режиме «отопление» с максимальной тепловой мощностью 6 кВт/ч с зоной линейной модуляции 2,4–6,0 кВт/ч, оснащена отдельным патрубком для подключения магистрали газового клапана. Две боковые зоны коллектора горелки имеют отдельные патрубки подключения газовой магистрали. При работе котла в режиме «ГВС» происходит одновременная работа всех форсунок. Подача газа производится в каждую часть коллектора горелки. Котел оборудован экспериментальным газовым клапаном с дополнительным электромагнитным клапаном подачи газа в боковые части коллектора горелки. В режиме «ГВС» работают все 11 форсунок горелки. Внешний вид атмосферной горелки представлен на рис. 2.

Горелка оснащена в центральной части двумя электродами поджига и электродом ионизации газа. Для организации формирования горючей смеси газа в закрытой камере сгорания и принудительного дымоудаления в верхней части камеры сгорания установлен вентилятор с электродвигателем асинхронного типа с постоянной скоростью вращения ротора



Рис. 2. Двухдиапазонная атмосферная горелка с трехсекционным коллектором настенного газового котла

мощностью 35 Вт. Подача воздуха для работы котла в режиме «отопление», требующая меньшего расхода, чем в режиме «ГВС», осуществляется за счет установки в цепь питания вентилятора дополнительного реле и конденсатора, обеспечивающих необходимую пониженную скорость вращения. Испытания работы котла проводились на научно-исследовательском стенде завода «Ардерия» (Патент RU 205883). На рис. 3 показаны фотографии камеры сгорания котла с работающими горелками в режиме «отопление» и «ГВС» при максимальных и минимальных давлениях газа перед горелкой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение коэффициентов полезного действия выполнялось прямым методом с измерением расходов горючего газа, расходов теплоносителя в контуре циркуляции, температур на входе и выходе в котел. Измерения проводились по три раза. На графиках результатов испытаний представлены средние значения.

Графики изменения КПД по отношению к нижней теплотворной способности топлива для установившихся режимов работы котла приведены на рис. 4.

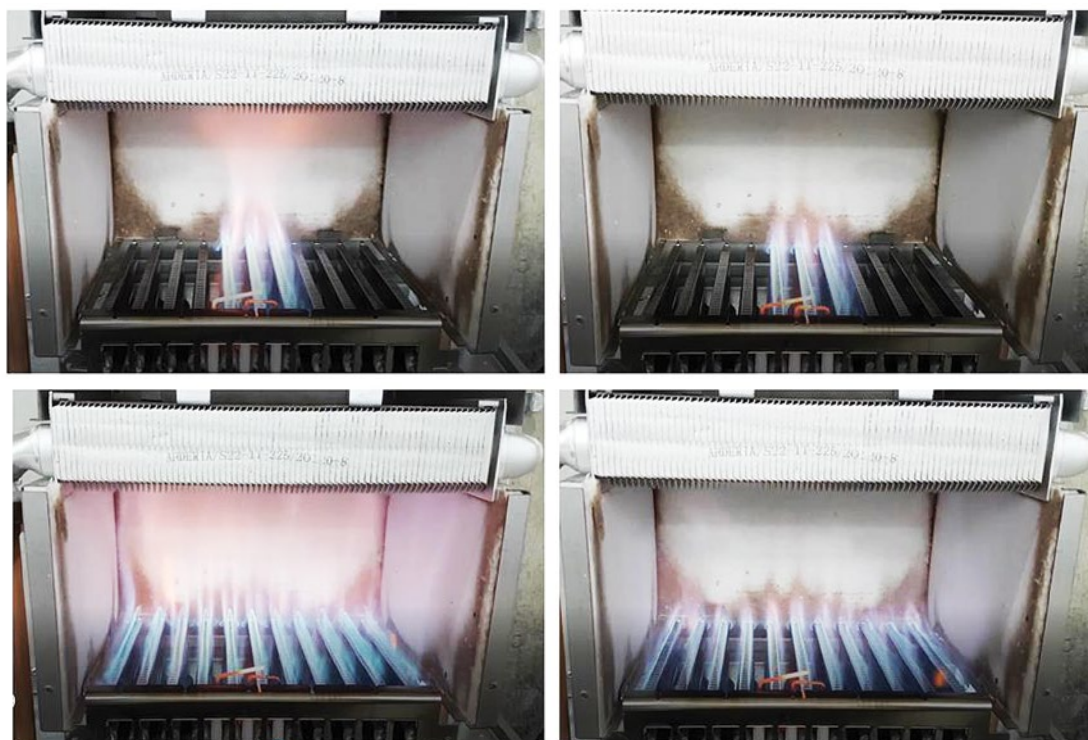


Рис. 3. Работа настенного котла с двухдиапазонной атмосферной горелкой в режимах «отопление» и «ГВС» при максимальных и минимальных значениях давления газа перед горелкой

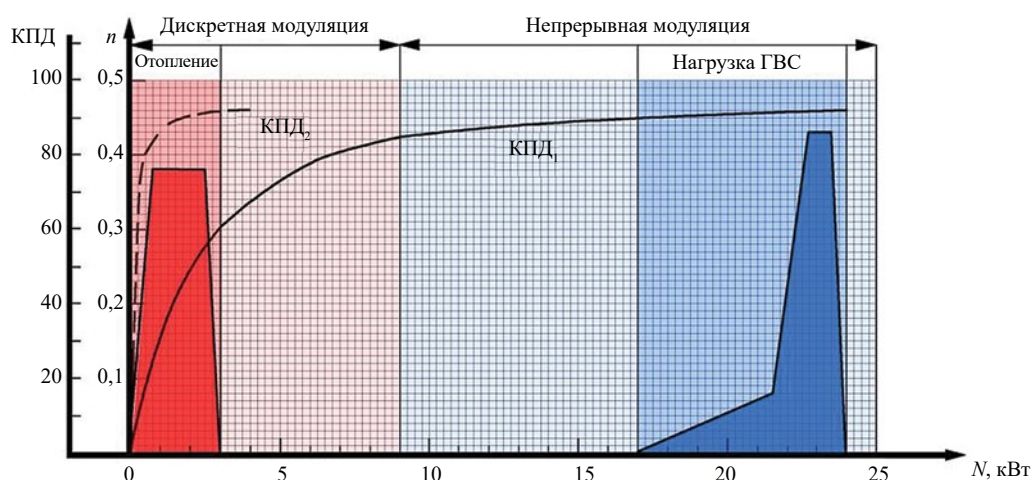


Рис. 4. Тепловая нагрузка и коэффициенты полезного действия настенного газового котла с двухдиапазонной атмосферной горелкой:  $n$  — частота возникновения тепловой нагрузки; красным цветом отмечен режим «отопление», синим — режим «ГВС»; КПД — коэффициент полезного действия; КПД<sub>1</sub> — режим «ГВС»; КПД<sub>2</sub> — режим «отопление»

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основная проблема применения настенных газовых котлов для поквартирного теплоснабжения заключается в использовании одного теплового генератора как для отопления помещения, так и подготовки горячей воды. В связи с разницей в 20–25 раз необходимой тепловой мощности для обеспечения данных процессов традиционные и конденсационные настенные котлы неспособны работать в режиме отопления в диапазоне плавной модуляции мощности. Это особенно ярко выражается для квартир площадью 40–50 м<sup>2</sup>, для маломерных квартир в многоквартирных домах.

На рис. 4 представлены частоты возникновения потребности тепловой энергии для компенсации тепловых потерь на отопление и ГВС для двухкомнатной квартиры многоквартирного дома в Санкт-Петербурге и диапазонов плавной модуляции экспериментального настенного газового котла с двухдиапазонной атмосферной горелкой с двумя форсунками для работы в режиме «отопление». При работе в режиме «отопление» котлы с однодиапазонной горелкой переходят в процесс постоянного включения-выключения (дискретной модуляции). Поскольку объем теплоносителя таких автономных систем отопления составляет около 25 л, время полного оборота теплоносителя будет при стандартных циркуляционных насосах около двух минут. За это время радиаторы отопления не могут передать тепловую энергию отапливаемому помещению, потому что обладают тепловой инерцией, значительно превышающей указанное время [20]. У конвекционных настенных котлов с атмосферной горелкой минимальная мощность — не менее 9 кВт/ч. Этого достаточно, чтобы нагреть теплоноситель выше установленного на всех настенных котлах верхнего порога температуры напорной магистрали первичного теплообменника, равного 80 °С. Остановка работы котла произойдет вне зависимости от температуры воздуха в помещении по причине перегрева теплоносителя в теплообменнике котла. Система переходит в режим постоянного включения-выключения-тактования. Алгоритмы всех выпускаемых в настоящее время настенных котлов имеют время выбега вентилятора — время работы без режима горения. Этот период времени составляет, в зависимости от торговой марки котла, от 35 до 60 секунд. При этом холодный атмосферный воздух обдувает основной теплообменник газового котла, принудительно охлаждая его. Потери тепловой энергии при каждом цикле — около 65 Вт. Если использовать конвекционный настенный газовый котел с закрытой камерой сгорания, то количество циклов тактования составит до 10–15 раз в час. Потери тепловой энергии могут составлять 900 кВт/ч, при том, что теплотери через ограждающие конструкции квартиры и систему вентиляции в этот период отопительного сезона составляют менее 1000 Вт/ч. Принцип

работы теплового агрегата в режиме дискретной модуляции, применяемой для режима «отопление» с целью поквартирного теплоснабжения, крайне неэффективен и может иметь КПД менее 50 %.

На рис. 4 показаны диапазоны изменения требуемой тепловой мощности для режимов отопления и ГВС, если использовать традиционный настенный газовый котел с максимальной мощностью 24 кВт и атмосферную горелку с одним диапазоном плавной модуляции тепловой мощности (график КПД<sub>1</sub>).

В расчетах энергетической эффективности систем поквартирного теплоснабжения, выполненных на базе существующих настенных котлов, применение коэффициентов полезного действия, определенных для установившихся режимов работы, указанных в технической документации производителей котлов, приводит к значительно завышенным результатам.

Конденсационные котлы имеют коэффициент модуляции мощности, равный 7. Это позволяет работать с тепловой нагрузкой от 3,5 кВт/ч для котлов с максимальной мощностью 25 кВт/ч. Однако эта минимальная мощность в три раза превышает тепловые потери для средней температуры отопительного периода применительно к квартирам с площадью 40–50 м<sup>2</sup>. Использование трубок Вентури с гравитационным клапаном для смеси воздуха с горючим газом позволяет увеличить диапазон модуляции конденсационных котлов до 10 раз, но данный клапан не обеспечивает стабильное образование газозооной смеси при минимальных значениях мощности. В момент каждого пуска конденсационного настенного котла есть период времени продолжительностью до минуты, когда значения выбросов парниковых газов в 2–3 раза превышают их значения в установившемся режиме работы котла. Применение конденсационных котлов для режимов работы с постоянными включениями-выключениями горелки крайне вредны как с точки зрения надежности работы котла, так и его энергетической эффективности, и величины выбросов парниковых газов. Конвекционные и конденсационные настенные газовые котлы проектируются для работы в зоне стабильной и медленно изменяющейся тепловой нагрузки. Работа в режиме дискретной модуляции мощности не соответствует назначению котлов, сопровождается повышенным выбросом парниковых газов и низким значением энергетической эффективности.

Предложенное решение настенного конвекционного газового котла с атмосферной горелкой с двумя диапазонами плавной модуляции отдельно для режима «отопление» и подготовки горячей воды значительно повышает показатели экологичности и энергетической эффективности. Горелка работает в установившемся режиме плавной модуляции практически весь отопительный период. Количество форсунок многофакельной атмосферной го-

релки, предназначенных для работы котла в режиме отопления при поквартирном теплоснабжении, определяется размером площади квартиры. Исследованный вариант с тремя форсунками в режиме отопления и 11 форсунками для режима ГВС применим для квартир площадью 60–70 м<sup>2</sup>. Для маломерных квартир можно использовать горелки с двумя форсунками с целью режима «отопление».

Данное решение с точки зрения энергетической эффективности лучше применения конденсационных котлов для поквартирного теплоснабжения по нескольким причинам. Одна из них — традиционное использование в России отопительных приборов радиаторного типа. В Великобритании конденсационные котлы применяются также при радиаторных отопительных приборах. Понижение температуры в обратной магистрали контура отопления достигается увеличением в два раза размеров радиатора. Теплоотдача радиаторов отопления при низких значениях температуры поверхности секций слабая и эффект применения конденсационных котлов, по сравнению с конвекционными котлами, не превышает 2–4 %. В то же время и сами конденсационные котлы, и их обслуживание, и повышенные размеры отопительных приборов — это дополнительные финансовые затраты. В случае применения конденсационных котлов для поквартирного теплоснабжения данный эффект еще мень-

ше, поскольку эти котлы не предназначены для малых помещений.

На основании результатов исследования можно сделать следующие выводы:

- применение традиционных конвекционных настенных, как и конденсационных газовых котлов, для поквартирного теплоснабжения при размерах квартир до 60 м<sup>2</sup> приводит к работе котлов в режиме дискретной модуляции тепловой мощности, которая сопровождается значительным снижением энергетической эффективности системы теплоснабжения;
- режим работы с дискретной модуляцией тепловой мощности сопровождается повышенными выбросами парниковых газов;
- при расчете энергетической эффективности систем отопления применение декларируемых производителями котлов коэффициентов полезного действия приводит к значительно завышенным результатам, поскольку в режиме дискретной модуляции мощности данные показатели значительно ниже;
- использование для поквартирного теплоснабжения настенных конвекционных котлов с атмосферной горелкой с двумя диапазонами плавной модуляции мощности позволяет применять их с высокой эффективностью, поскольку большую часть времени данные горелки работают в зоне плавной модуляции тепловой мощности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pardo G.N., Vatopoulos K., Krook-Riekkola A., Moya R.J., Perez L.A. Heat and cooling demand and market perspective. EUR 25381 EN. Luxembourg (Luxembourg) : Publications Office of the European Union, 2012. JRC70962. DOI: 10.2790/56592
2. Ibrahim O., Fardoun F., Younes R., Louahli-Gualous H. Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects // *Building and Environment*. 2014. Vol. 72. Pp. 259–286. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.09.006
3. Andrić I., Pina A., Ferrão P., Lacarrière B., Le Corre O. On the performance of district heating systems in urban environment: an emergy approach // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 142. Pp. 109–120. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.124
4. Vignali G. Environmental assessment of domestic boilers: A comparison of condensing and traditional technology using life cycle assessment methodology // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 142. Pp. 2493–2508. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.025
5. Zheng G., Bu W. Review of heating methods for Rural houses in China // *Energies*. 2018. Vol. 11 (12). P. 3402. DOI: 10.3390/en11123402
6. Наумов Н.Р., Марьяндышев П.А., Попов А.Н., Любов В.К. Исследование работы газовых

- котлов малой мощности // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2017. № 4 (79). С. 27–33. DOI: 10.23859/1994-0637-2017-4-79-4
7. Табуничиков Ю.А. Конденсационные котлы в автономном теплоснабжении // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2016. № 4. С. 26–31.
8. Хаванов П.А., Чуленев А.С. Климатические параметры и эффективность конденсационных котлов // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2016. № 3. С. 56–63.
9. Хаванов П.А., Чуленев А.С. Результаты испытаний конденсационного котла при различных режимах эксплуатации // *Научное обозрение*. 2015. № 10–1. С. 45–49.
10. Khavanov P.A., Chulenyov A.S. The dependence of the efficiency of the condensing boiler by use and climatic zone // *Biosciences, Biotechnology Research Asia*. 2015. Vol. 12. Issue 3. Pp. 3019–3026. DOI: 10.13005/bbra/1985
11. Khavanov P.A., Chulenyov A.S. Physical model of a heat mass transfer in condensation surfaces and its compliance to skilled data // *Global Journal*

of Pure and Applied Mathematics. 2016. Vol. 12. Pp. 545–558.

12. *Aksenov A.K., Kosorukov D.P.* Application of condensation economizers in order to increase the energy efficiency of gas boilers of a traditional type // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2020. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271452

13. *Adan H., Fuerst F.* Do energy efficiency measures really reduce household energy consumption? A difference-in-difference analysis // Energy Efficiency. 2016. Vol. 9. Pp. 1207–1219. DOI: 10.1007/s12053-015-9418-3

14. *Rosenow J., Galvin R.* Evaluating the evaluations: Evidence from energy efficiency programmes in Germany and the UK // Energy and Buildings. 2013. Vol. 62. Pp. 450–458. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2013.03.021

15. *Nord N., Sjøthun S.F.* Success factors of energy efficiency measures in buildings in Norway //

Energy and Buildings. 2014. Vol. 76. Pp. 476–487. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.010

16. *Торопов А.Л.* Вопросы эффективности работы конвекционных настенных газовых котлов при поквартирном теплоснабжении // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2021. № 6. С. 42–45.

17. *Пилипенко Н.В.* Тепловые потери и энергетическая эффективность зданий и сооружений : учебное пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2016. 54 с.

18. *Хаванов П.А.* Атмосферные газовые горелки автономных теплогенераторов // АВОК: Вентиляция. Отопление. Кондиционирование. 2003. № 1. С. 54–56.

19. *Торопов А.Л.* Исследование работы газовых клапанов конвекционных котлов малой мощности // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2020. № 3. С. 58–71.

20. *Пухкал В.А.* Исследование инерционности отопительных приборов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 269.

Поступила в редакцию 28 февраля 2022 г.

Принята в доработанном виде 24 мая 2022 г.

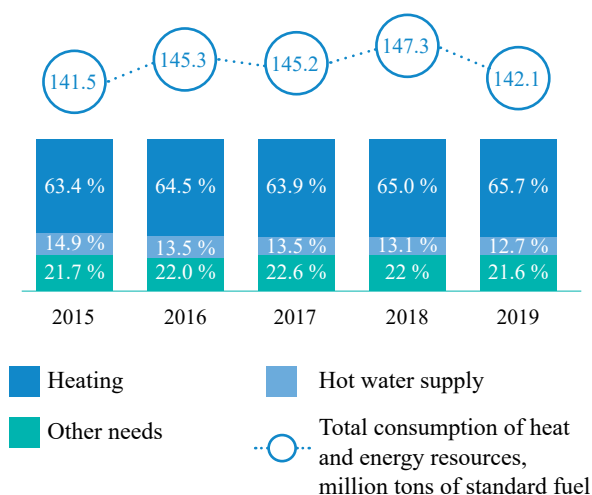
Одобрена для публикации 24 мая 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: **Алексей Леонидович Торопов** — кандидат технических наук, генеральный директор — главный конструктор; **Инженерный центр «Апрель»**; 105122, г. Москва, Щелковское шоссе, д. 13; РИНЦ ID: 1030472, ORCID: 0000-0002-7457-6948; toropov@aprilgroup.ru.

## INTRODUCTION

A comfortable living environment is a basic human need. Heating and hot water systems are the main tool used to set and maintain the indoor temperature, humidity and hygienic conditions in places of the physical location of people. Over the past century, the influence of man-made factors on the natural environment has greatly increased and its negative consequences are the threats and risks to the further development of mankind. Some of these factors involve an increase in the amount of greenhouse gases in the Earth's atmosphere. The creation of artificial habitat, higher hydrocarbon fuel combustion, needed to meet some growing human needs, cause substantial emissions of carbon dioxide and nitrogen oxides. More than 65 % of all energy is consumed by heating, and 13 % is consumed by hot water supply systems. The total consumption of fuel and energy resources (FER) and its breakdown are shown in Fig. 1<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> State Report “On the state of energy saving and increasing energy efficiency in the Russian Federation”. Ministry of Economic Development of the Russian Federation. Moscow, 2020. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c3901dba442f8e361d68bc019d7ee83f/Energyefficiency2020.pdf>



**Fig. 1.** Breakdown of natural resources consumed by humans

Heating is responsible for 70 % and hot water supply (HWS) — for 14 % of the total energy consumed by the residential sector of the European Union (EU) constituent states [1]. All developed economies pay attention to improving the energy efficiency of buildings and heating systems. A reduction in greenhouse gas emissions, accompanying the operation of thermal units of heating systems, is a task of federal impor-

tance, and its accomplishment is controlled by the authorities<sup>2, 3, 4</sup>.

The independent heating of apartment blocks (apartment heating) has been developing in the Russian Federation over the past fifteen years. For this purpose, the thermal energy of double-circuit wall-mounted gas boilers is used, and their total number is about three million items. Much attention is driven to the choice of their modes of operation, feasibility and environmental analyses [2]. The environmental impact of centralized and decentralized heating systems is compared in several works [3–5].

When wall-mounted gas boilers are used to heat independent premises, regardless of their location, a condensing technology is preferable [6–12].

Publications [13–15] analyze the influence of various factors on the energy efficiency of buildings and greenhouse gas emissions that accompany the operation of heat generators consuming traditional fuels. Respective studies were conducted in the UK, Norway and Germany. They have proven that wall insulation, reducing annual gas consumption by 10.5 % and annual electricity consumption by 8 %, is the best energy efficiency booster for buildings, having independent heating systems. The installation of new energy efficient (condensing) boilers reduces gas consumption by 4.1 % and electricity consumption by 5.2 %. Given that the climate in these countries is largely the same as the climate in some regions of the Russian Federation, these studies can be applied to the territory of Russia with a high degree of reliability. The most effective way to increase the energy efficiency of buildings is the supplementary insulation of building envelopes coupled with the use of advanced boilers.

The regulatory acts of the Russian Federation, listing the types of authorized heat generators of independent heating systems, do not prohibit the use of wall-mounted gas boilers. The share of these boilers in “apartment-wide heating” is 98 % [16]. Given that the service life of these boilers is about 7 years, their share will not fall below 90 % in the coming decade. The problem of wall-mounted convection boilers is that one boiler is used as a source of heating and hot water supply to an apartment. Pursuant to the sanitary standards, the amount of thermal energy, consumed

by the HWS, equals to, at least, 15 kW. The comfortable amount of hot water consumed in an apartment with two hot water consumption points requires a heat generator with the thermal capacity of, at least, 24 kW. The thermal power, needed to heat small apartments in multi-storey buildings even during extremely cold periods of a heating season, does not exceed 2.5 kW, and its average value is up to 1.3 kW [17]. Hence, the heat capacity range should be multipliable by twenty, if one heat generator is used as a source of heating and HWS. Wall-mounted convection boilers, equipped with atmospheric multi-flame burners, have a range of continuous modulation that can go up 2.5 — fold [18, 19]. Condensing wall-mounted boilers have a range of steady smooth modulation in which the initial value may go up seven-fold. No condensing and convection boilers can ensure smooth modulation for the entire heat load range (heating + HWS). When operating in the heating mode, boilers switch to discrete modulation that triggers the on/off switching of the boiler burner, accompanied by substantial emissions of combustion products due to the unsteady mode of operation. It is necessary to prevent the operation of the boiler for indoor space heating in the discrete modulation mode. A wall-mounted gas boiler, equipped with a two-stage burner, should be designed for this purpose.

The objective of the research is to study the parameters of a wall-mounted gas boiler used as part of an independent heating system designated for small apartments. These boilers have gas burners, operating in the smooth modulation zone; they are used as a source of indoor heating and hot water supply.

## MATERIALS AND METHODS

### *Laboratory research*

The object of the study is Arderia D24, an experimental double-circuit wall-mounted gas boiler, that has an atmospheric multi-flame burner with eleven nozzles. The manifold of the burner is divided into three zones. The central zone has three nozzles, each of the two side zones has four nozzles (Patent RU 203004). The central zone is designed to run the boiler in the heating mode with the maximum thermal capacity of 6 kW/h and a 2.4–6.0 kW/h linear modulation zone. It has a separate nozzle that serves as a connection to the gas valve main. The two side zones of the burner manifold have gas line connection nozzles. When the boiler is in the HWS mode, all nozzles operate simultaneously. Gas is fed to each part of the burner manifold. The boiler is equipped with an experimental gas valve that has an additional solenoid valve feeding gas to the sides of the burner manifold. When the boiler is in the HWS mode, all eleven burner nozzles are in operation. The external view of the atmospheric burner is shown in Fig. 2.

The burner is equipped with two ignition electrodes and a gas ionization electrode. A fan with an asynchro-

<sup>2</sup> Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings. Strasbourg (France). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0031>

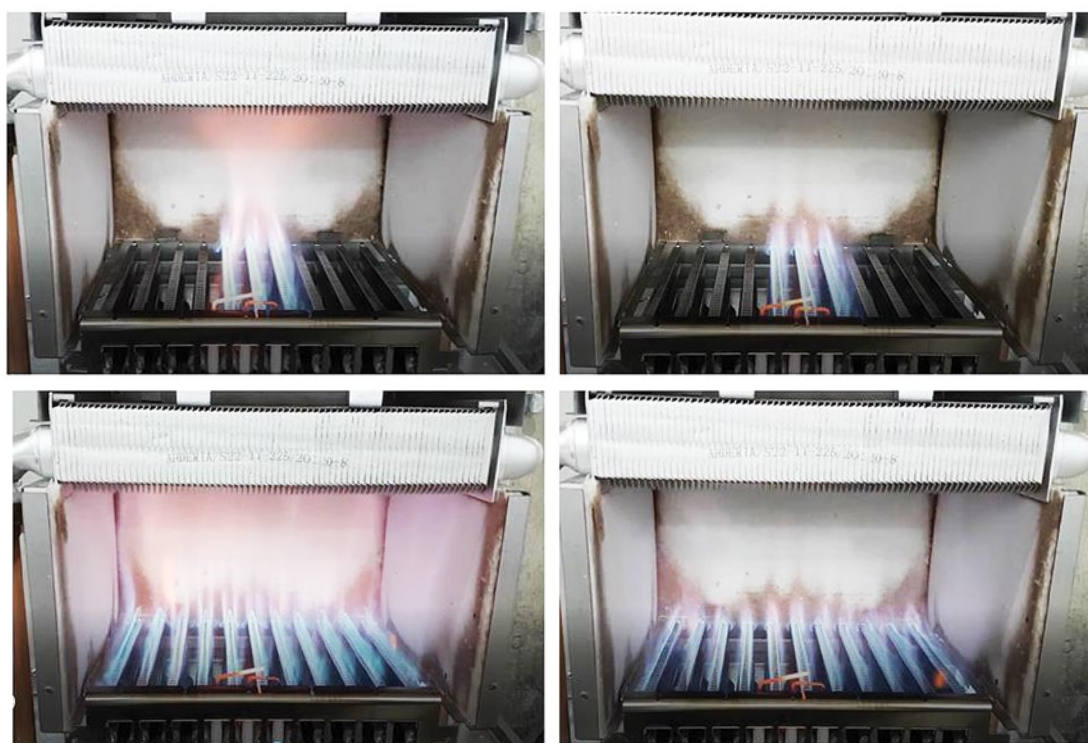
<sup>3</sup> World energy balances 2020 edition. Database documentation. URL: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/4f314df4-8c60-4e48-9f36-bfea3d2b7fd5/WorldBAL\\_2020\\_Documentation.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/4f314df4-8c60-4e48-9f36-bfea3d2b7fd5/WorldBAL_2020_Documentation.pdf)

<sup>4</sup> On Energy Saving and energy efficiency and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation : Federal Law of 23.11.2009 No 261-FZ. URL: <https://fzakon.ru/laws/federalnyy-zakon-ot-23.11.2009-n-261-fz/>

nous type electric motor, operating at the constant rotor speed of 35 W, is installed to make a combustible gas mixture in a closed combustion chamber and evacuate smoke from the upper part of the combustion chamber. The amount of air, needed for the boiler to operate in the heating mode, is smaller than that needed for the HWS mode. The air is fed through an additional relay and a condenser into the fan supply circuit to ensure a lower rotation speed. The boiler was tested at the test bench of Arderia plant (Patent RU 205883). Fig. 3 shows the photos of the boiler combustion chamber with burners operating in the heating and HWS modes at maximum and minimum gas pressure values in front of the burner.



**Fig. 2.** Dual-range atmospheric burner with a three-section manifold of a wall-mounted gas boiler



**Fig. 3.** Operation of a wall-mounted boiler with a dual range atmospheric burner in the heating and HWS modes at maximum and minimum values of gas pressure in front of the burner

## RESULTS OF RESEARCH

Efficiency coefficients were found using a direct method of measuring the combustible gas consumption rate, heat conductor flow rates in the circulation loop, and temperatures at the boiler inlet and outlet. Each measurement was taken three times. Graphs of the test results show the average values.

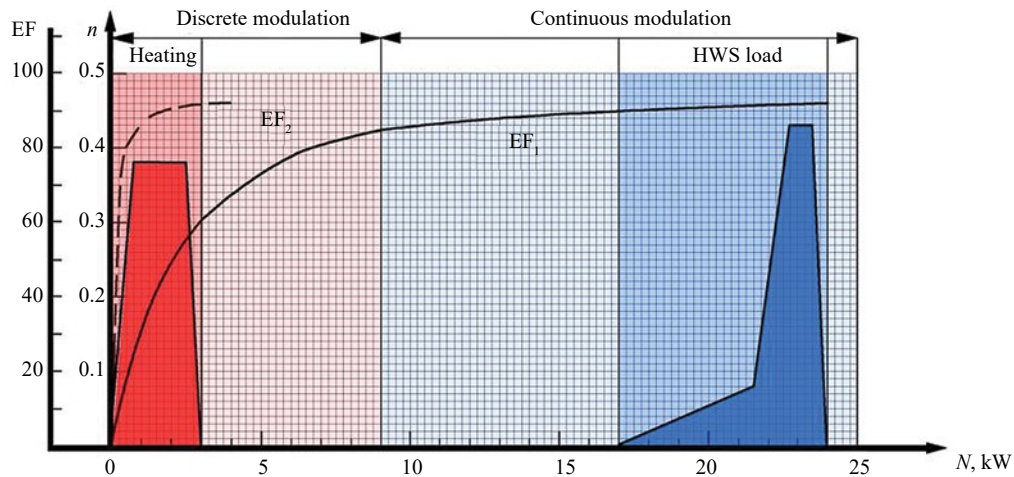
Diagrams showing a change in the efficiency factor in relation to the bottom calorific value of the fuel in steady modes of the boiler operation are shown in Fig. 4.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

The main problem of using wall-mounted gas boilers in apartment heating is the application of one heat

generator for indoor space heating and hot water preparation. Due to the difference in the thermal capacity required for these purposes, that is equal to 20–25 times, traditional and condensing wall-mounted boilers cannot operate in the heating mode in the range of smooth power modulation. This is particularly true for apartments with an area of 40–50 m<sup>2</sup> and small apartments in multi-storey buildings.

Fig. 4 shows the frequency of cases of the need for heat energy designated to compensate for the heat losses in the process of heating of and hot water supply to a one-bedroom apartment in a multi-storey building in St. Petersburg and smooth modulation ranges of an experimental wall-mounted gas boiler with a dual-range atmospheric burner that has two nozzles designated for operation in the heating mode. When in the heat-



**Fig. 4.** Heat load and efficiency of a wall-mounted gas boiler with a dual-range atmospheric burner:  $n$  is the heat load frequency; the red line shows the heating mode, the blue line shows the HWS mode;  $EF$  is the efficiency factor;  $EF_1$  is the HWS mode;  $EF_2$  is the heating mode

ing mode, boilers that have single-range burners switch to discrete modulation. Since the amount of heat conductor in such independent heating systems is about 25 l, the turnaround time of the heat conductor will be about two minutes if standard pumps are used. During this time radiators cannot transfer thermal energy to the heated room, because their thermal inertia exceeds this time period by far [20]. The minimum capacity of wall-mounted convection boilers with atmospheric burners is, at least, 9 kW/h. This is enough for the temperature of the heat conductor to exceed the upper threshold temperature limit of the pressure main of the primary heat exchanger, set for 80 °C. The boiler will stop operating regardless of the indoor temperature due to the overheated heat conductor in the boiler heat exchanger. The system switches to a permanent on-off-contact mode. The algorithms of all currently manufactured wall-mounted boilers have a fan overrun down time, or the time of operation without a combustion mode. Depending on the boiler brand, this time period varies from 35 to 60 s. In this case, cold atmosphere air blows at the main heat exchanger of the gas boiler to force cool it. The heat energy loss during each cycle is about 65 W. If a wall-mounted convection gas boiler with a closed combustion chamber is used, the number of combustion cycles will be up to 10–15 per hour. The heat energy loss can be 900 kW/h, while the heat loss through the building envelope of an apartment and the ventilation system during this period of the heating season is below 1,000 W/h. The discrete modulation mode, used to heat an apartment, is extremely inefficient and its efficiency can be below 50 %.

Fig. 4 shows the ranges of variation in the required heat capacity required for heating and HWS modes, if a conventional wall-mounted gas boiler with a maximum capacity of 24 kW and an atmospheric burner with one range of smooth modulation (graph  $EF_1$ ) is used.

The use of efficiency factors determined for steady operating modes, specified in the technical documen-

tation issued by the boiler manufacturer, leads to significantly overestimated results according to the energy efficiency analysis of apartment heating systems, that have wall-mounted boilers.

Condensing boilers have a capacity modulation factor equal to seven which ensures their operation under the heat load of 3.5 kW/h for boilers whose maximum capacity is 25 kW/h. However, this minimum capacity is three times higher than the heat loss at the average temperature of the heating period in relation to apartments with an area of 40–50 m<sup>2</sup>. The use of Venturi tubes with a gravity valve for mixing air with combustible gas expands the modulation range of condensing boilers 10 — fold, although it cannot ensure the stable formation of gas-air mixture at the minimum capacity. Each actuation of a wall-mounted condensing boiler is followed by a period of time up to one minute, when greenhouse gas emissions are 2–3 times higher than those in the steady mode of operation. A permanent on-off mode of condensing boiler burners is extremely harmful in terms of the boiler reliability, energy efficiency, and greenhouse gas emissions. Convection and condensing wall-mounted gas boilers are designed to operate in areas of stable and slowly changing heat loads, while their operation in the mode of discrete power modulation fails to meet the functional purpose of boilers and is accompanied by higher greenhouse gas emissions and low energy efficiency.

The proposed solution entails two ranges of smooth modulation: one for the heating mode, and the other for hot water preparation. Hence, it can substantially improve the environmental performance and energy efficiency. The burner operates in a steady mode of smooth modulation during the entire heating period. The number of nozzles in the multi-flame atmospheric burner, designed for the boiler operation in the heating mode, is determined by the apartment area. The studied design option, that has three nozzles for the heating mode and eleven nozzles for the HWS mode, is appli-

cable in apartments with the floor area of 60–70 m<sup>2</sup>. In small apartments, burners with two nozzles can be used in the heating mode.

As for the energy efficiency, this solution is better than the use of condensing boilers for apartment heating for several reasons. One of them is the traditional use of radiator-type heaters in Russia. In the UK, condensing boilers are also used in combination with radiator heaters. A lower temperature in the return line of the heating circuit is achieved by doubling the size of the radiator. The thermal capacity of heating radiators at the low surface temperature of the sections is small and the effect of condensing boilers, if compared with convection boilers, does not exceed 2–4 %. However, condensing boilers, their maintenance, and the large size of heating devices mean higher expenses. This effect is even less pronounced in the case of application of condensing boilers for independent apartment heating, since these boilers are not designed for small rooms.

Given the results of the study, the following conclusions can be made:

- if the floor area of an apartment is up to 60 m<sup>2</sup>, the use of conventional wall-mounted convection boilers and condensing gas boilers for apartment heating triggers the discrete modulation mode of boilers, which is accompanied by a substantial reduction in the energy efficiency of the heating system;
- a discrete modulation mode involves higher greenhouse gas emissions;
- the use of declared efficiency coefficients leads to the overestimated results of energy efficiency calculations, since these figures are much lower in the discrete modulation mode;
- the use of wall-mounted convection boilers with atmospheric burners, having two ranges of modulation, are highly efficient in independent apartment heating, because most of the time these burners operate in the zone of smooth modulation.

## REFERENCES

1. Pardo G.N., Vatopoulos K., Krook-Riekkola A., Moya R.J., Perez L.A. *Heat and cooling demand and market perspective. EUR 25381 EN*. Luxembourg (Luxembourg), Publications Office of the European Union, 2012; JRC70962. DOI: 10.2790/56592
2. Ibrahim O., Fardoun F., Younes R., Louahli-Gualous H. Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects. *Building and Environment*. 2014; 72:259-286. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.09.006
3. Andrić I., Pina A., Ferrão P., Lacarrière B., Le Corre O. On the performance of district heating systems in urban environment: an emergy approach. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 142:109-120. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.124
4. Vignali G. Environmental assessment of domestic boilers: A comparison of condensing and traditional technology using life cycle assessment methodology. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 142:2493-2508. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.025
5. Zheng G., Bu W. Review of heating methods for Rural houses in China. *Energies*. 2018; 11(12):3402. DOI: 10.3390/en11123402
6. Naumov N.R., Maryandyshev P.A., Popov A.N., Lyubov V.K. Study on gas boilers of low capacities. *Cherepovets State University Bulletin*. 2017; 4(79):27-33. DOI: 10.23859/1994-0637-2017-4-79-4 (rus.).
7. Tabunshchikov Y.A. Condensing boilers in autonomous heat supply. *AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermal physics*. 2016; 4:26-31. (rus.).
8. Havanov P.A., Chulenev A.S. Climatic Parameters and Efficiency of Condensation Boilers. *AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermal physics*. 2016; 3:56-63. (rus.).
9. Havanov P.A., Chulenev A.S. Results of condensing boiler tests under different operational regimes. *Scientific Review*. 2015; 10-1:45-49. (rus.).
10. Khavanov P.A., Chulenyov A.S. The dependence of the efficiency of the condensing boiler by use and climatic zone. *Biosciences, Biotechnology Research Asia*. 2015; 12(3):3019-3026. DOI: 10.13005/bbra/1985
11. Khavanov P.A., Chulenyov A.S. Physical model of a heat mass transfer in condensation surfaces and its compliance to skilled data. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2016; 12:545-558.
12. Aksenov A.K., Kosorukov D.P. Application of condensation economizers in order to increase the energy efficiency of gas boilers of a traditional type. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271452
13. Adan H., Fuerst F. Do energy efficiency measures really reduce household energy consumption? A difference-in-difference analysis. *Energy Efficiency*. 2016; 9:1207-1219. DOI: 10.1007/s12053-015-9418-3
14. Rosenow J., Galvin R. Evaluating the evaluations: Evidence from energy efficiency programmes in Germany and the UK. *Energy and Buildings*. 2013; 62:450-458. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2013.03.021
15. Nord N., Sjøthun S.F. Success factors of energy efficiency measures in buildings in Norway. *Energy and Buildings*. 2014; 76:476-487. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.010

16. Toropov A.L. Issues of operating efficiency of convection wall gas boilers with apartment heat supply. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2021; 6:42-45. (rus.).
17. Pilipenko N.V. *Heat losses and energy efficiency of buildings and structures*. St. Petersburg, ITMO University, 2016; 54. (rus.).
18. Havanov P.A. Atmospheric gas burners of autonomous heat generators. *AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermal physics*. 2003; 1:54-56. (rus.).
19. Toropov A.L. Analysis of operation of gas valves of low-power convection boilers. *AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermal physics*. 2020; 3:58-71. (rus.).
20. Puhkal V.A. Study of the inertia of heating appliances. *Modern Problems of Science and Education*. 2014; 5:269. (rus.).

*Received February 28, 2022.*

*Adopted in revised form on May 24, 2022.*

*Approved for publication on May 24, 2022.*

**B I O N O T E S:** **Alexey L. Toropov** — Candidate of Technical Sciences, General Director — Chief Designer; **Engineering Center “April”**; 13 Schelkovskoe shosse, Moscow, 105122, Russian Federation; ID RISC: 1030472, ORCID: 0000-0002-7457-6948; toropov@aprilgroup.ru.