

DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-6-84-92

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ В СРЕДЕ ASPEN PLUS

А.А. Михин, В.В. Сергеев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

Mikhanton89@mail.ru

Резюме: В статье рассмотрена схема глубокой утилизации теплоты дымовых газов. Установлено, что в котельных агрегатах, работающих на природном газе, единственным путем существенного улучшения использования топлива является глубокое охлаждение продуктов сгорания до такой температуры, при которой удается сконденсировать максимально возможную часть паров, содержащихся в газах. Для анализа основных энергетических показателей конденсационной установки и оптимизации ее режимов работы было выполнено моделирование приоритетной схемы в среде Aspen Plus. В настоящей схеме присутствуют тройники, теплообменники и реактор (топка котла). Настройка тройников (смесителей) осуществляется путем задания расходов или долей двух потоков, входящих или выходящих из элемента. Топка котла моделируется в качестве реактора Гиббса, который рассчитывает химическое и термодинамическое равновесие за счет минимизации разницы энергии Гиббса продуктов и исходных веществ. С помощью компьютерной программы Aspen Plus было выполнено моделирование схемы конденсационной установки на котельном агрегате ПТВМ-100 с уточнением оптимальных режимных параметров материальных потоков и теплообменного оборудования. Проведенные расчет показывают, что при использовании конденсационного котла достигается тройной энергетический эффект: используется физическая теплота уходящих газов; используется выделяющаяся при конденсации скрытая теплоту парообразования; используется конденсат, выделяющийся из дымовых газов.

Ключевые слова: конденсационный котел; котельные агрегаты, теплогенераторы; дымовые газы; теплообменное оборудование, математическая модель.

Для цитирования: Михин А.А., Сергеев В.В. Моделирование конденсационной установки в среде ASPEN PLUS // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. № 6. С.84-92. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-84-92.

SIMULATION OF CONDENSATION UNIT IN ASPEN PLUS

AA Mikhin, VV Sergeev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia Mikhanton89@mail.ru

Abstract: The article discusses the scheme of deep utilization of the heat of flue gases. It has been established that in boiler units operating on natural gas, the only way to significantly improve the use of fuel is to deeply cool the combustion products to a temperature at which it is possible to condense the maximum possible portion of the fumes contained in the gases. To analyze the main energy indicators of the condensing unit and optimize its operating modes, a priority scheme was simulated in Aspen Plus. In this scheme, there are tees, heat exchangers and a reactor (boiler furnace). The configuration of tees (mixers) is carried out by setting the costs or fractions of two flows entering or leaving the element. The boiler furnace is modeled as a Gibbs reactor, which calculates the chemical and thermodynamic equilibrium by minimizing the difference in the Gibbs energy of the products and the starting materials. Using the Aspen Plus computer program, the condensation unit circuit was simulated at the PTVM-100 boiler unit with the specification of the optimal operating parameters of material flows and heat exchange equipment. The calculations show that when using a condensing boiler, a triple energy effect is achieved: the physical heat of the flue gases is used; the latent heat of

vaporization released during condensation is used; the condensate released from the flue gases is used.

Keywords: condenser; boiler; flue gases; heat generators; heat exchangers; mathematic model.

For citation: Mikhin AA, Sergeev VV. Simulation of condensation unit in *ASPEN PLUS*. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):84-92. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-84-92.

Введение

Основным преимуществом использования природного газа в котельных агрегатах является малая величина тепловых потерь [1-3]. Потери теплоты от механического недожога в этом случае отсутствуют, потери теплоты от химической неполноты горения топлива близки к нулю, потери теплоты в окружающую среду при использовании эффективных современных теплоизоляционных материалах весьма малы [4, 5]. Единственной потерей теплоты в котлах, о дальнейшем снижении которой может идти речь, является лишь потеря с уходящими газами, которая по отношению к низшей теплоте сгорания газа составляет 5-6 % [6, 7]. Отсюда следует вывод: в котельных агрегатах, работающих на природном газе, единственным путем существенного улучшения использования топлива является глубокое охлаждение продуктов сгорания до такой температуры, при которой удается сконденсировать максимально возможную часть паров, содержащихся в газах [8]. Конденсационные котлы работают с высокой эффективностью даже в условиях высокой нагрузки. Развитие технологий газовой конденсации открывает большие возможности для снижения потребления газа в многоквартирных домах, а также в офисных зданиях. Коэффициент использования топлива может достигать теоретического значения более 110% при отнесении на низшую теплоту сгорания [9, 10]. Материалы с высокой коррозионной активностью, возникающей в результате конденсации газа, были серьезной проблемой в промышленности на протяжении многих лет использования агрегатов [11]. Трещины, вызванные коррозией, обнаружены в основном в низкотемпературных теплообменниках (обычно при температуре от 70 до 90 ° теплообменники, правило, изготавливались из как низкоуглеродистой стали. При этом, большинство трещин случилось там, где механические напряжения были относительно высокими. Микроскопический анализ образцов показал, что часто происходила межкристаллитная коррозия.

Во избежание коррозии из-за конденсации газов, очень важно хорошо понимать состав и количество конденсированной жидкости, которая может образоваться в конденсационных котлах. Методы расчета процесса конденсации интенсивно совершенствовались в течение последних нескольких десятилетий. Для чистого воздуха точку росы можно получить непосредственно из справочных данных для водяного пара. Но когда в газе присутствуют другие частицы, такие как SO_3 , SO_2 , HCl или NO_2 , точка росы будет отклоняться от идеальной линии точки росы. При атмосферном давлении, точка росы дымовых газов в присутствии этих компонентов может быть пересчитана с помощью уравнений, характерных для разных веществ. Чтобы противостоять агрессивным коррозионным условиям, конденсационные котлы в настоящее время изготавливаются из нержавеющей стали и других коррозионностойких материалов [12]. При этом затраты на материалы иногда втрое превышают аналогичные затраты для обыкновенных котлов. Одним из типовых материалов, используемых для данных агрегатов, являются нержавеющие стали, которые характеризуются высоким содержанием хрома и молибдена [13]. Кроме того, для изготовления конденсационных котлов могут применяться современные полимерные и композитные материалы.

Сегодня основная задача состоит в определении параметров, при которых обеспечивается надежная эксплуатация наружных газоходов и дымовых труб, отводящих в атмосферу охлажденные и частично осушенные в конденсационных теплообменниках продукты сгорания [14, 15]. В настоящее время находит применение установка дымовых труб, выполненных из стеклопластика, что расширяет возможности применения технологии глубокой утилизации теплоты дымовых газов [16, 17].

Материалы и методы

Наружный воздух, подаваемый на горение, предварительно нагревается в калориферной секции воздухоподогревателя и увлажняется в секции орошения после чего вентиляторной установкой подается в воздушный коллектор. Коллектор расположен

снаружи здания котельной вдоль линии приемных камер, которые подключены к коллектору отдельными патрубками. Из приемных камер воздух по существующим подпольным каналам подается на всос дутьевых вентиляторов, расположенных по обе стороны каждого котла. Для нагрева воздуха используется часть обратной сетевой воды, расход которой регулируется таким образом, чтобы ее температура за воздухоподогревателем составляла 20 °C. Увлажнение воздуха осуществляется конденсатом, выделяющимся из дымовых газов. Распыление конденсата в камере орошения производится через форсунки. Количество форсунок и расход конденсата на увлажнение определяются расчетом в зависимости от расхода воздуха на горение. При изменяющемся расходе воздуха количество распыляемого конденсата должно регулироваться. Воздухоподогреватель может быть дополнен секцией второго подогрева для повышения температуры воздуха после увлажнения. Вентилятор наружного воздуха должен быть оснащен частотно-регулируемым приводом для поддержания постоянного давления в воздушном коллекторе.

Уходящие дымовые газы забираются из газохода за котлом и подаются на утилизацию в охладитель дымовых газов, где охлаждаются до температуры близкой к температуре точки росы (примерно 52 °C). Далее охлажденные дымовые газы направляются в конденсационную часть утилизатора, где осуществляется конденсация водяных паров. Осушенные дымовые газы посредством дымососа удаляются в атмосферу. Схема утилизации теплоты дымовых газов выполняется таким образом, что газы забираются из одного работающего котла, а удаляются через дымовую трубу соседнего неработающего котла. Схема позволяет осуществлять реверсивную подачу дымовых газов на утилизацию и далее в атмосферу, используя пару котлов, стоящих рядом. Утилизируемое тепло дымовых газов передается обратной сетевой воде. Поступающая из тепловой сети обратная вода перед утилизацией разделяется на несколько частей. Основная часть (примерно 86 %) поступает непосредственно на вход котла. Другая часть подается на воздухоподогреватель, где ее температура снижается до 20 °C, чтобы интенсифицировать процесс конденсации водяных паров из дымовых газов в утилизаторе. Кроме того, некоторый объем обратной воды подается в охладитель для предварительного охлаждения дымовых газов в сухом виде. Перед утилизатором оба потока воды смешиваются, а после него подогретая вода подается в основной поток обратной воды на входе в котел. При наличии низкопотенциальных потребителей они нагреваются водой за утилизатором в теплообменнике. Вода, нагревающая низкопотенциальных потребителей, циркулирует через теплообменник, тем самым увеличивая объем воды в утилизаторе и, соответственно, теплосъем В конденсационной части утилизатора. низкопотенциального потребителя осуществляется собственным насосом потребителя, в зависимости от его назначения. Образующийся конденсат, частично может использоваться для увлажнения воздуха, а также подаваться на подпитку тепловой сети после очистки от растворенных в нем газов.

Результаты

Одним из эффективных методов решения широкого спектра задач, относящихся к высокотемпературным процессам и установкам, является математическое моделирование, выполняемое в программно-вычислительных комплексах. К числу этих комплексов, разработанных в технологии визуального программирования, относится и интерактивная информационно-моделирующая среда Aspen Plus. Данная среда обеспечивает возможность моделирования процессов, основанных на химическом и фазовом превращении, позволяет выполнять конструктивные расчеты и оценку стоимости оборудования. Для анализа основных энергетических показателей конденсационной установки и оптимизации ее режимов работы было выполнено моделирование приоритетной схемы (рис. 1) в среде Aspen Plus.

В настоящей схеме присутствуют тройники, теплообменники и реактор (топка котла). Настройка тройников (смесителей) осуществляется путем задания расходов или долей двух потоков, входящих или выходящих из элемента. Топка котла моделируется в качестве реактора Гиббса, который рассчитывает химическое и термодинамическое равновесие за счет минимизации разницы энергии Гиббса продуктов и исходных веществ. Фактически данный реактор можно использовать для большинства химических процессов в энергетике и технологии (горение, пиролиз, газификация и т.д.).

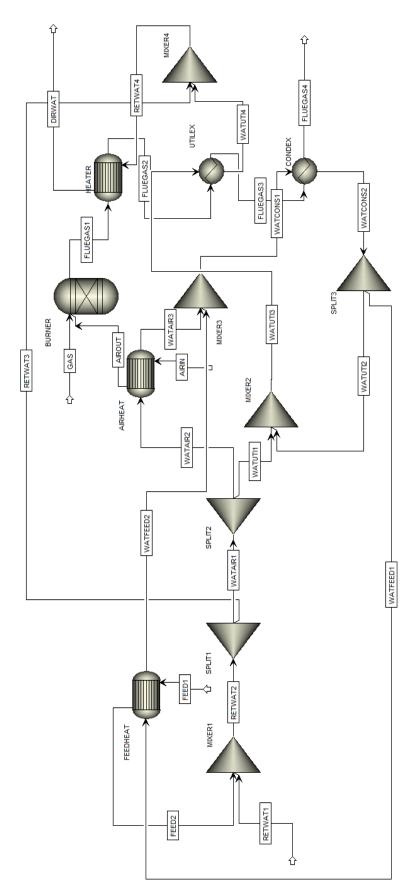
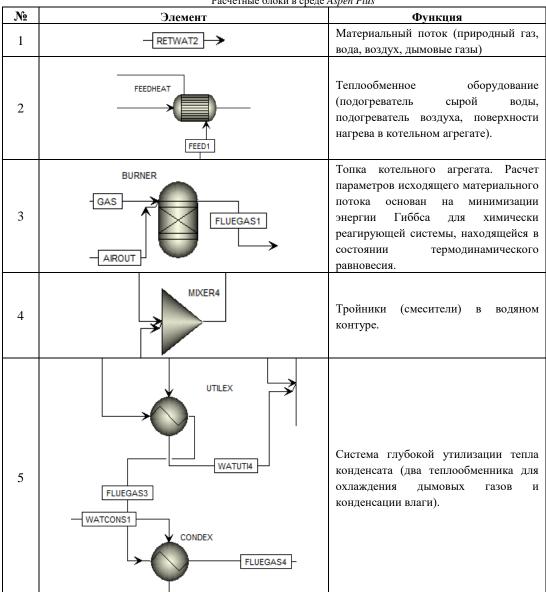


Рис. 1. Установка глубокой утилизации тепла дымовых газов в среде Aspen Plus На рис. 1 представлена расчетная модель, которая включает в себя следующие позиции (табл. 1).

Расчетные блоки в среде Aspen Plus



Для моделирования топки водогрейного котельного агрегата достаточно задать следующие условия: расчет фазового и химического равновесия, давление в реакторе (если выставить 0 бар, то программа воспринимает это как отсутствие потерь и ориентируется на давление исходных веществ; задание абсолютного значение строго определит давление на выходе из реактора), тепловой эффект (в данном примере также рассматривается 0 Гкал/ч). Для завершения настройки модели необходимо нанести на схему пять теплообменных аппаратов (подогреватель сырой воды, подогреватель воздуха, поверхности нагрева в котельном агрегате, утилизатор теплоты дымовых газов и конденсатор). Корректный расчет теплообменного оборудования возможен при указании соответствующего критерия расчета, к примеру, температура холодного потока на выходе. Аналогично могут быть выбраны температуры на входе/выходе для любого из потоков, разница температура, фаза и др.

Обсуждение

Непосредственно конденсационная установка, состоящая из двух теплообменных поверхностей, в первом приближении может быть рассмотрена как классический теплообменный аппарат, в котором важно задать соответствующие критерии расчета во вкладке *Exchanger Specification*. В случае если исходных данных недостаточно, программа сигнализирует красным цветом напротив той позиции, которая требует доработки. Расчет в программе возможен только после того, как все красные предупреждения будут заменены на синие «галочки». По окончании ввода всех данных необходимо провести инициализацию системы и запустить расчет нажатием соответствующей кнопки на лицевой панели. Основными результатами проведенного расчета являются T-Q диаграммы для целевых теплообменников (рис. 2 и 3): утилизатор теплоты дымовых газов и конденсатор.

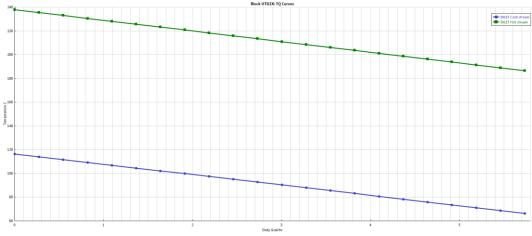


Рис. 2. Диаграмма для утилизатора теплоты дымовых газов

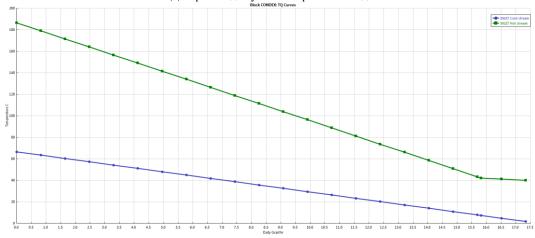


Рис. 3. Диаграмма для конденсатора

Таким образом, с помощью компьютерной программы *Aspen Plus* было выполнено моделирование схемы конденсационной установки на котельном агрегате ПТВМ-100 с уточнением оптимальных режимных параметров материальных потоков и теплообменного оборудования. Кроме того, расчетная модель позволяет в первом приближении оценивать выбросы парниковых газов в пересчете на углекислый газ. В частности, количество углекислого газа, содержащегося в продуктах горения природного газа, в данном случае составило 23569,6 кг/ч (рис. 4).

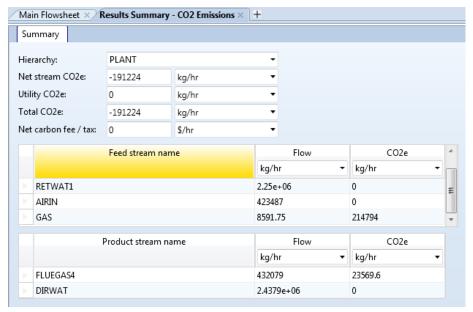


Рис.4. Анализ эмиссии углекислого газа

Согласно проведенному расчету для котла ПТВМ-100 видно, что в максимальном

режиме эффект от охлаждения дымовых газов соизмерим с эффектом от конденсации. Во всех других случаях эффект от конденсации водяных паров в дымовых газах является наибольшим (рис. 5 и 6).

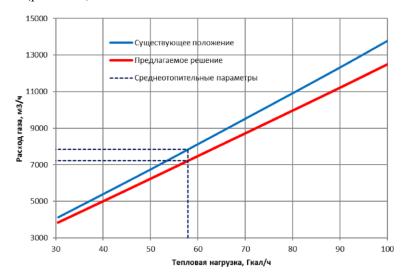


Рис. 5. Сравнительный график расхода топлива котлом

Необходимо отметить, что в данном случае рассмотрен самый распространенный случай с открытой системой теплоснабжения города, где величина подпитки тепловой сети существенна. Как показывают проведенные расчеты доля энергетического эффекта от использования нагрузки горячего водоснабжения (ГВС) в данной схеме составляет в зависимости от нагрузки котла от 50 до 60% от общего технически достигаемого результата, что является существенным фактором при принятии решения о внедрении данной технологии. Данная схема позволяет осуществлять регулировку распределения теплоносителя между элементами схемы, определять загрузку каждого элемента, находить граничные значения, проводить конструктивную и режимную оптимизацию.

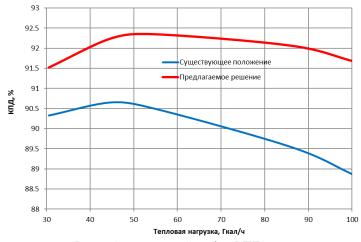


Рис. 6. Сравнительный график КПД котла

Заключение

Верификация расчетной модели выполнена для схемы котла ПТВМ-100 без и с подключенной утилизационной установки при работе в отопительном режиме. В качестве исходных данных приняты результаты проведенного обследования котельных агрегатов. В среднезимнем режиме подключенная отопительно-вентиляционная нагрузка составляет 44,6 Гкал/ч, нагрузка горячего водоснабжения — 7 Гкал/ч. Проведенные расчет показывают, что при использовании конденсационного котла достигается тройной энергетический эффект: используется физическая теплота уходящих газов; используется выделяющаяся при конденсации скрытая теплоту парообразования; используется конденсат, выделяющийся из дымовых газов.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. За счет повышения температуры воздуха на горение снижаются потери с уходящими газами, повышается КПД котла.

- 2. Подогрев обратной воды перед котлом снижает нагрузку на котел и снижается расход топлива.
 - 3. Наибольший эффект имеется при конденсации водяных паров в уходящих газах.
- 4. Наибольший эффект имеет место в системах с открытой системой теплоснабжения, с высокой нагрузкой на горячее водоснабжение.

Литература

- 1.Kovacevic.M., Lambic M., Radovanovic L, et al. Increasing the Efficiency by Retrofitting Gas Boilers into a Condensing Heat Exchanger, Energy Sources Pt B-Economics Planning and Policy. 2017. V.12 (5). pp. 470-479.
- 2. Vigants G, Galindoms G, Veidenbergs I, et al. Efficiency diagram for district heating system with gas condensing unit. Energy Procedia. 2015. V.7. pp. 119-26.
- 3.Sippula O., Hokkinen, J., Puustinen, H., et al. Particle emissions from small wood-fired district heating units. Energy & Fuels. 2009. N.23. pp. 2974-2982.
- 4.Grohn, A., Suonmaa, V., Auvinen, A., et al. Reduction of fine particle emissions from wood combustion with optimized condensing heat exchangers. Environmental Science and Technology. 2009. V.43. pp. 6269-6274.
- 5.EPSRC thermal management of Industrial processes // Review of Industrial Condensing Boilers Technology & Cost. 2010.
- 6.Burns, J.M., Tsou J. Modular steam condenser replacements using corrosion resistant high performance stainless steel tubing. 2018.
- 7.Che D., Liu Y., Gao C. Evaluation of retrofitting a conventional natural gas fired boiler into a condensing boiler. Energy Conversion & Management. 2004. V.45. pp. 3251-3266.
- 8.Hasan, A.; Kurnitski, J.; Jokiranta, K. A combined low temperature water heating system consisting of radiators and floor heating. Energy and Buildings. 2009. V.41. pp. 470-479.
- 9.Satyavada.H., Baldi S., Novel A. Modelling Approach for Condensing Boilers Based on Hybrid Dynamical Systems, Machines. 2016. V.4. N. 2 P.10.
- 10.Хачалов М.А., Юркина М.Ю. Энергосбережение в теплогенерирующих установках за счет глубокого охлаждения продуктов сгорания в конденсационных теплоутилизаторах. Сб. трудов НИУ «МЭИ», г. Москва, 2007. С. 311-316.
- 11.Шадек Е., Маршак Б., Крыкин И., и др. Конденсационный теплообменник-утилизатор модернизация котельных установок // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. 2014. № 3 (24).
- 12.Кудинов А. А., Зиганшина С. К. Энергосбережение в теплоэнергетике в теплотехнологиях. М.: Машиностроение, 2011. 374 С.
- 13.Lazzarin R. The importance of the modulation ratio in the boilers installed in refurbished buildings. Energy Build 2014. V.75. pp. 43–50.
- 14.Dan-Teodor Bălănescu, Vlad-Mario Homutescu Study on condensing boiler technology potential accounting various fuels. Procedia Manufacturing. 2019 .V.32. pp.504-512.
- 15.Жигурс А., Церс А., Плискачев С. Опыт АО «Ригас Силтумс» в реконструкции водогрейных котлов КВГМ-50 и КВГМ-100 // Новости теплоснабжения. 2009, № 4. С. 34-39.
- 16.Mohammed Amer, Miao-Ru Chen, Uzair Sajjad, et al. For suitability of plastic heat exchangers for dehumidification applications. Applied Thermal Engineering. 2019. V.158. P. 113-827.
- 17.Kevin Michael Smith, Svend Svendsen Development of a plastic rotary heat exchanger for room-based ventilation in existing apartments. Energy and Buildings. 2015.V.107 .pp. 1-10.

Авторы публикации

Михин Антон Александрович — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия.

Сергеев Виталий Владимирович – д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия.

References

- 1. Kovacevic M, Lambic M, Radovanovic L, et al. Increasing the Efficiency by Retrofitting Gas Boilers into a Condensing Heat Exchanger, Energy Sources Pt B Economics Planning and Policy. 2017;12(5):470-479.
- 2. Vigants G, Galindoms G, Veidenbergs I, et al. Efficiency diagram for district heating system with gas condensing unit. *Energy Procedia*. 2015; 72:119–26.

- 3. Sippula O, Hokkinen J, Puustinen H, et al. Particle emissions from small wood-fired district heating units. *Energy & Fuels*. 2009;23:2974-2982.
- 4.Grohn A, Suonmaa V, Auvinen A, et al. Reduction of fine particle emissions from wood combustion with optimized condensing heat exchangers. *Environmental Science and Technology*. 2009;43:6269-6274.
- 5.EPSRC thermal management of Industrial processes. Review of Industrial Condensing Boilers. *Technology & Cost.* 2010.
- 6.Burns JM, Tsou J. Modular steam condenser replacements using corrosion resistant high performance stainless steel tubing. 2018.
- 7.Che D, Liu Y, Gao C. Evaluation of retrofitting a conventional natural gas fired boiler into a condensing boiler. Energy. *Conversion & Management*. 2004;45:3251-3266.
- 8.Hasan A, Kurnitski J, Jokiranta K. A combined low temperature water heating system consisting of radiators and floor heating. *Energy and Buildings*. 2009;41:470-479.
- 9.Satyavada H, Baldi S. A Novel Modelling Approach for Condensing Boilers Based on Hybrid *Dynamical Systems, Machines* .2016;42:10.
- 10.Khachalov MA, Yurkina MYu. Energy saving in heat generating plants due to deep cooling of combustion products in condensing heat exchangers. *Proceedings of MPEI conference, Moscow*, 2007. pp. 311-316.
- 11. Shadek E, Marshak B, Krykin I, et al. Condensing heat exchanger-utilizer-modernization of boiler plants. *Promyshlennye i otopitelnye kotelnye i mini-TEZ*. 2014;3 (24).
- 12.Kudinov AA, Ziganshina SK. *Energy Saving in heat power engineering and heat technologies*. Moscow: Mashinostroenie, 2011. 374 p.
- 13.Lazzarin R. The importance of the modulation ratio in the boilers installed in refurbished buildings. *Energy Build*. 2014;75:43–50.
- 14.Dan-Teodor Bălănescu, Vlad-Mario. Homutescu Study on condensing boiler technology potential accounting various fuels. *Procedia Manufacturing*. 2019;32:504–512.
- 15. Zhigurs A, Tsers A, Pliskachev S. Experience of JSC "Rigas siltums" in the reconstruction of hot water boilers KVGM-50 and KVGM-100. *Novosti teplosnabgenia*. 2009;4:34-39.
- 16.Mohammed Amer, Miao-Ru Chen, Uzair Sajjad, et al. Experiments for suitability of plastic heat exchangers for dehumidification applications. *Applied Thermal Engineering*, 2019;158:113-827.
- 17.Kevin Michael Smith, Svend Svendsen. Development of a plastic rotary heat exchanger for room-based ventilation in existing apartments. *Energy and Buildings*. 2015;107:1-10.

Authors of the publication

Anton A. Mikhin - Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.

Vitaliy V. Sergeev - Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.

Поступила в редакцию

22 ноября 2019 г.