свидетельствующих о том, что агент свободен, в ходе работы сети отражают его состояние (свободен или занят), при этом цвет фишки содержит информацию о задаче, обрабатываемой агентом. После поступления задачи на обработку переход, свидетельствующий о том, что агент захвачен, сработать не сможет, так как нет фишки в позиции, указывающей, что агент свободен. Не разрешен также переход, демонстрирующий, что агент выполняет обработку из-за того, что фишка, имитирующая таймер, несет временной штамп, равный 2 с (2000 мс). В случае, если установлено, что нет доступных переходов, происходит наращивание счетчика глобальных часов до тех пор, пока не «откроется» переход, указывающий на то, что агент выполняет обработку, так как штамп фишки в позиции *timer 2c* окажется равен значению глобальных часов. В результате начнется освобождение агентов посредством срабатывания перехода, свидетельствующего о том, что агент выполняет обработку. Таким образом, позиция, свидетельствующая о свободе агента, приобретает фишку со значением *done* (задача выполнена), переход захвата агента активизируется, перемещая следующую фишку на позицию использования агента. Процесс обработки задач прекращается в случае, если не остается фишек в позиции *wait* [5].

При выполнении процесса моделирования сложных систем на базе аппарата сетей Петри задается определенное количество входных задач и анализируется поведение системы. На основе выходных данных формируются статистические результаты.

При анализе сложных систем с использованием аппарата сетей Петри стоит выделить такие основные свойства, как: ограниченность, безопасность, сохраняемость, достижимость, живость [4].

Анализируя свойства вышеупомянутой модели можно сделать вывод, что она:

1. Неограниченная, так как число меток в любой позиции рассматриваемой модели может превысить некоторое максимальное значения K.

2. Небезопасная, так как K≠1.

3. Несохраняемая в силу непостоянства загрузки ресурсов. Число входов в каждый переход не равняется числу выходов.

4. Достижимая из-за наличия возможности перехода модели из одного заданного состояния (характеризуемого распределением меток) в другое.

5. Живая, так как любой из переходов срабатывает при наличии поступающих задач.

6. Наличие данных свойств у модели вызвано заданной архитектурой, большими объемами поставленных задач.

Полученные результаты моделирования применяются при построении агентной составляющей адаптивной информационной системы, оценке качества функционирования на предприятиях или их отделах, оперирующих значительными объемами информации.

Сети Петри позволяют отражать динамические характеристики моделей. Аппарат цветных сетей Петри, реализуемый в среде CPN Tools, позволил смоделировать и проанализировать работу системы на предприятии, специализирующемся на предоставлении услуг в области создания интернет-ресурсов и их продвижении в поисковых системах, с учетом ее архитектуры, выявить наиболее загруженные элементы.

Литература

1. *Владимиров, А.В.* Общая модель взаимодействия интеллектуальных агентов в многоагентной адаптивной информационной системе / А.В. Владимиров // Вузовская наука – региону: Материалы X Всероссийской научно-технической конференции. – Вологда, 2012. – С. 104 – 106.

2. *Владимиров, А.В.* Построение адаптивной информационной системы на основе базы знаний / А.В. Владимиров // Вузовская наука – региону: Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. – Вологда, 2011. – С. 48 – 49.

3. *Зайцев, Д.А.* Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools: учеб. пособие по курсу «Математическое моделирование информационных систем» для подготовки магистров в отрасли связи / Д.А. Зайцев, Т.Р. Шмелева. – Одесса, 2008.

4. Сети Петри. – URL: http://ru.wikipedia.org/ wiki/ Сети_Петри.

5. *Шахов, В.Ю.* Моделирование программно-аппаратных «реактивных» систем раскрашенными сетями Петри / В.Ю. Шахов. – Долгопрудный, 2005. – URL: http:// www.softcraft.ru/theory/mrs/index.shtml.

УДК 662.6/9

В.К. Любов, П.В. Малыгин, А.Н. Попов, Е.И. Попова, С.В. Дементей

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОТОПИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В МОДУЛЬНЫХ МАЛОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЯХ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

В статье рассмотрен вопрос эффективности энергетического использования биотоплива и торфа в установках малой мощности. Приведены результаты экспериментальных исследований и тепловизионной съемки камина и модульного дома.

Камин, биотопливо, торф, тепловизионная съемка, коммунально-бытовой сектор.

The question of efficiency of energy use of biofuels and peat in low-powered installations is considered in the article. The results of experimental research and thermovision shooting of the fireplace and modular house are presented in the paper.

Fireplace, biofuel, peat, thermovision shooting, domestic household.

Эффективным направлением комплексного решения энергетических и экологических проблем при обеспечении отопительных нагрузок потребителей коммунально-бытового сектора является применение современных устройств, работающих на твердых видах биотоплива и торфе. В этом направлении большую значимость имеют работы по исследованию характеристик отечественного и зарубежного отопительного оборудования, позиционированного на рынке как высокоэффективное и при этом имеющее эргономичный дизайн и эстетичный вид. Последние два аспекта за короткий период времени приобрели большое значение в результате изменения взглядов в обществе и отказа от идеи, что эффективность решает все. Перед учеными встал вопрос о создании не только совершенной в техническом плане, но и комфортной во всех отношениях отопительной установки. Попытки создания таких устройств привели к появлению отопительных каминов, каминных вставок и кассет, которые успешно вписываются в интерьер помещений, сохраняя при этом высокий КПД. Однако при эксплуатации практически всегда выявляются те или иные недостатки, которые требуют изучения и доработки. Это может касаться как конструкции самого устройства, так и вида применяемого топлива. Грамотные решения позволяют повысить эффективность работы установок, при этом они могут заключаться всего лишь в составлении оптимальной технологической карты для котельных или рекомендаций для индивидуальных пользователей.

Научной площадкой для проведения исследовательских работ было выбрано экспериментальное деревянное модульное здание, установленное в 2007 г. при реализации международного проекта «Энергоэкономичный деревянный дом для Северо-Запада России». Объект расположен на территории Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова (САФУ) (рис. 1).

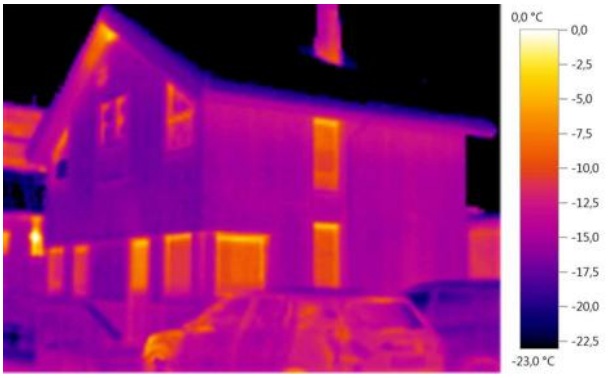


Рис. 1. Термограмма деревянного модульного здания

Дом состоит из четырех модулей, внутри и снаружи выполнена чистовая отделка и смонтированы внутренние инженерные коммуникации, а также сантехническое, вентиляционное и кухонное оборудование. Площадь экспериментального деревянного модульного здания сравнима с площадью среднестатистической трехкомнатной российской квартиры.

В процессе длительной эксплуатации экспериментального дома в различные места по толщине стен были вмонтированы современные проводные и беспроводные датчики с автономными аккумуляторами для передачи показаний температуры и влажности на компьютер. На объекте размещено 25 беспроводных датчиков: 5 датчиков – снаружи, 7 – внутри стен, 9 – в помещениях, 2 – на чердаке, 2 – в подвале, и 39 проводных сенсоров, измеряющих температуру воздуха снаружи, внутри здания, в вентилируемом фасаде (6 сенсоров), температуру поверхностей на двух стенах (12 сенсоров), температуру поверхностей системы отопления (16 сенсоров) и системы вентиляции (5 сенсоров).

Основная система отопления здания состоит из электрокотла и нагревательных приборов, оборудованных индивидуальными устройствами регулирования. Контроль и программирование параметров теплоносителя предусмотрены только на электрокотле, и все коррективы, связанные с переменой погоды или с изменением требований, предъявляемых к микроклимату в помещениях, осуществляются вручную. Установка датчиков контроля микроклимата в помещении и использование управляющего контроллера могли бы автоматизировать процесс выбора параметров теплоносителя и исключить человеческий фактор.

В качестве резервного источника теплоты в помещении установлен отопительный камин, работающий на твердом топливе. Отопительный камин «Jotul F 373» – это современное устройство с высоким панорамным стеклом на дверце и прямоугольными термостойкими стеклами по бокам толщиной 4 мм, что позволяет увеличить пространство помещения, нагреваемое за счет радиационного теплообмена. Камин оборудован двухступенчатой системой подачи воздуха, это обеспечивает более полное выгорание горючих компонентов. Вторичный воздух поступает в камеру, предварительно разогреваясь в каналах между нагретыми стенками печи. Для удаления очаговых остатков из камина используется зольник.

Камин отличается небольшой массой (156 кг) и может быть установлен без организации специального фундамента. Устройство в нижней части оснащено теплозащитным экраном, который защищает покрытие от теплового излучения, поэтому его можно ставить даже на деревянный пол. Внешний корпус камина выполнен из чугуна, что способствует его быстрому прогреву, а внутренние стенки защищены слоем вермикулита, который является огнеупорным

материалом и исключает перегрев камеры в момент получения высоких температур при сжигании высококачественного топлива. Под качественным топливом подразумеваются дрова с содержание влаги не более 20 %. Использование влажной древесины в качестве топлива может иметь следующие негативные последствия: отложение сажи и смолы на стеклах и стенках камина, уменьшение тепловыделения, увеличение риска возгорания в дымоходе в результате накопления сажи, трудности при розжиге и поддержании огня.

Работа устройства основывается на периодической закладке топлива в момент, когда на колоснике остаются тлеющие угли. При номинальной производительности потребление древесины составляет 1,9 кг/ч. Важным фактором, влияющим на потребление топлива, является реакционная поверхность, зависящая от размера и количества кусков топлива.

При небольших габаритах (высота × ширина × глубина: 1150 × 442 × 452 мм) номинальная мощность составляет 5,5 кВт, а КПД – 73 % при мощности 5,8 кВт. Номинальная теплоотдача достигается, когда регулятор подачи вторичного воздуха для горения открыт приблизительно на 100 % и регулятор подачи первичного воздуха для горения (на розжиг) выдвинут на 1 – 2 см. Минимальная мощность устройства 3,5 кВт, максимальная – 9 кВт.

Для хорошего горения необходима хорошая тяга. При обычных условиях необходимой и достаточной считается тяга, равная 10 – 20 Па. В создании тяги большую роль играет конструкция дымохода, и одним из основных параметров является его высота. Использование колен уменьшает тягу за счет дополнительного сопротивления. Диаметр дымохода не должен быть меньше диаметра дымоотвода, расположенного в верхней части камина, и для «Jotul F 373» составляет 150 мм. Возникновение обратной тяги из-за несоблюдения рекомендаций по конструкции дымохода приводит к задымлению помещения.

На внутренней поверхности камина во время эксплуатации может осаждаться сажа. Сажа является хорошим изолятором, а ее отложение приводит к уменьшению теплоотдачи установки. Если на стенках камина отложилась сажа, ее легко удалить при помощи сажеудалителя. С точки зрения санитарно-гигиенических показателей, камин является абсолютно безопасным, поскольку в открытом состоянии потребляет приблизительно 300 – 400 $м^3$ воздуха в час, а в закрытом – около 30 $м^3$/ч.

Комплексное энергетическое исследование проводилось с целью определения технико-экономических и экологических показателей работы отопительного камина при сжигании различных видов твердого топлива. В ходе исследований использовались дрова (еловые, сосновые, березовые, осиновые), древесные брикеты, полученные прессованием опилок и стружки хвойных пород, древесные гранулы, полученные из ели, а также гранулы с добавкой коры, еловая кора и торфяные брикеты. Для исключения влияния климатических факторов на результаты экспериментов было принято решение проводить их при максимально близких температурах наружного воздуха, скорости ветра и отсутствии существенных осадков. Однако полной идентичности параметров метеорологических условий обеспечить не удалось, температура наружного воздуха составляла –6 … –15 °С, скорость ветра 2…7 м/с и бараметрическое давление 100,5…101,5 кПа.

Анализ работы камина выполнялся в соответствии с разработанным программно-методическим комплексом [1]. Температуры и состав дымовых газов измерялись с помощью газоанализатора «Testo-350 XL». Температуры наружных поверхностей отопительного камина и его газохода определялись пирометром «Center 350». Температуры в топке камина и температуры его внутренних стенок определялись с помощью инфракрасного пирометра «Optris P 20 2M». В газоходе отопительного камина с помощью микроманометра замерялось разрежение. Расходы продуктов сгорания определялись с помощью пневмометрической трубки и микроманометра прецизионного прибора «Testo – 435». Расход топлива определялся по количественным показателям обратного и прямого теплового балансов.

Для сжигаемых видов твердого топлива, а также очаговых остатков, образующихся при их сгорании, выполнялись теплотехнические анализы. Теплотворная способность топлива определялась с помощью калориметра IKA C 2000 basic Version 2. Определение влажности осуществлялось с использованием влагомера резисторного типа GMH 3850 и сушильного шкафа в зависимости от вида топлива.

Контроль за параметрами микроклимата в помещении при работе отопительного устройства осуществлялся с помощью прецизионного прибора «Testo – 435» и включал в себя определение температуры воздуха в зависимости от времени работы камина, объемного содержания диоксида углерода и относительной влажности воздуха.

Для исключения провала древесных гранул в зольник камина на колосниковую решетку была установлена дополнительная решетка с эквивалентным размером отверстий около 6 мм. Она находилась в топке камина при проведении всех экспериментов и имела удовлетворительное состояние после их завершения. Содержание горючих веществ в очаговых остатках, отобранных из зольника, составляло 3,7…15,65 %.

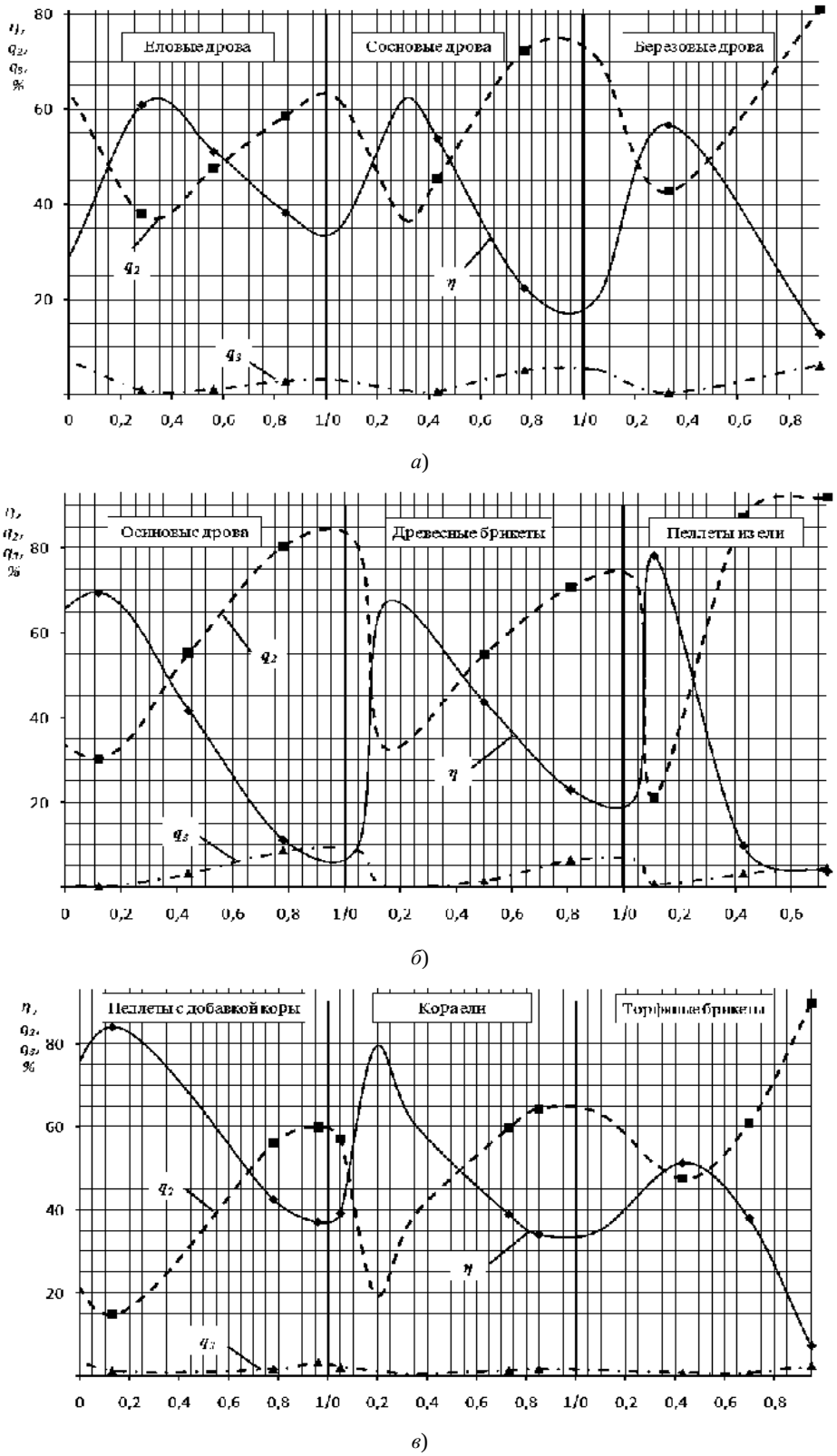
При существующей системе ручного регулирования режимов работы камина расход подаваемого воздуха в топку при проведении опытов не изменялся, при этом для всех режимов работы камина коэффициенты избытка воздуха в топочной камере имели высокие значения. Ступенчатое сжигание осуществлялось при полностью открытой задвижке вторичного воздуха и максимально возможной подаче первичного воздуха.

Организация ступенчатой схемы сжигания позволила обеспечить более полное выгорание горючих компонентов топлива, однако, избежать повышенных значений концентрации монооксида углерода (K_{CO} = 450–4351 мг/$нм^3$) не удалось, ввиду большого избытка воздуха в топочной камере.

Максимальный размах колебаний разрежения в

газоходе составил от 6 до 32 Па. Регулирующие устройства на газоходе отсутствуют.

Анализ условий тепловой работы камина показал, что потери теплоты с уходящими газами изменялись от 14,73 до 91,94 % (рис. 2) в зависимости от момента времени в цикле и вида топлива. Повышенный уровень данных потерь объясняется большими значениями коэффициента избытка воздуха в уходящих газах $\alpha_{ух}$ = 1,10 – 14,00.



а)

б)

в)

Рис. 2. Изменение КПД (η) отопительного камина, потерь теплоты с уходящими газами (q_2) и химическим недожогом (q_3) в период цикла между загрузками топлива:
а – в первый; *б* – во второй; *в* – в третий день работы

Несмотря на высокие значения коэффициента избытка воздуха в топочной камере, система ступенчатого сжигания топлива позволила получить невысокие значения эмиссий оксидов азота от 26 до 216 мг/МДж. Значения эмиссий диоксида серы для всех случаев равны нулю, кроме опыта № 12, в ходе которого сжигались торфяные брикеты, значения эмиссии при этом колебались в диапазоне от 281 до 288 мг/МДж.

Значения потерь теплоты с уходящими газами от химического недожога и КПД брутто камина значительно изменялись в пределах цикла между загрузками топлива (рис. 2). Величина пиковых значений КПД брутто определяется реакционной поверхностью сжигаемого топлива и его теплотехническими характеристиками. В ходе исследований было проведено 12 опытов. Основные результаты некоторых из них представлены в таблице (см. ниже).

Тепловизионное обследование экспериментального здания, а также камина и его газохода проводилось тепловизором «Testo 881-2», позволяющем получить в реальном времени картину распределения теплоты на поверхности объекта с точностью до 0,1 °С. Встроенная цифровая камера обеспечивает реальные изображения объектов помимо ИК-изображений.

В ходе исследований был сделан ряд снимков, позволяющих оценить работу камина (рис. 3) и энергоэффективность модульного здания (рис. 1). Проведенные исследования позволили выявить места основных утечек теплоты и оценить их уровень. Сравнение норвежского модульного здания с аналогами деревянных домов в России показало, что представленный нами дом является более энергоэффективным.

Результаты свидетельствуют, что в конструкции газохода и отопительного камина имеется ряд недостатков, которые снижают эффективность работы, а также способны при неблагоприятных погодных условиях создавать дискомфорт во время растопки. Энергоэкологические показатели отопительного камина не соответствуют значениям, заявленным в паспорте производителя, особенно в начальной и конечной фазе цикла между загрузками топлива.

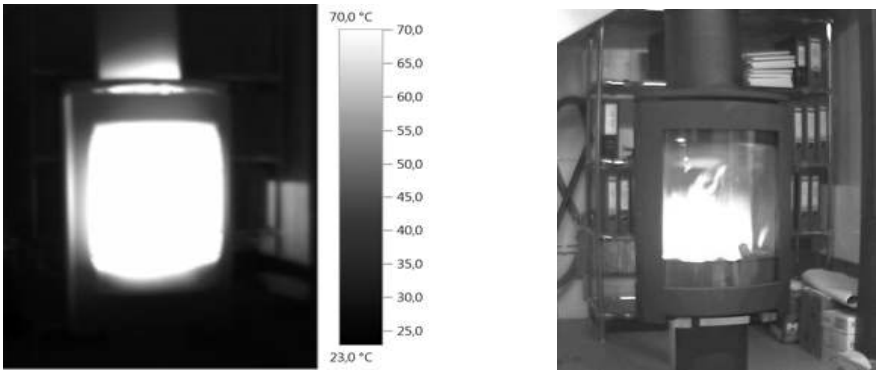
Итоги исследований позволили разработать рекомендации по модернизации конструкции камина и режимам сжигания различных видов твердого топлива, а также по утеплению экспериментального модульного здания.

Таблица

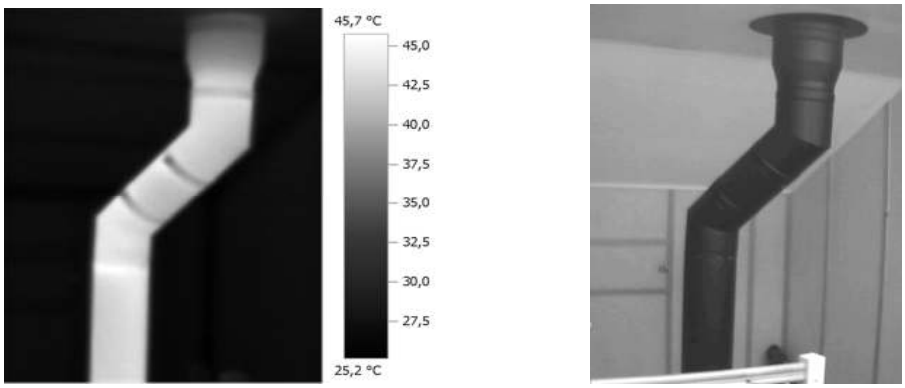
Результаты энергетического обследования отопительного камина «Jotul F 373»*

Наименование величины	Обозначение, размерность	Опыт 2	Опыт 4	Опыт 6	Опыт 7	Опыт 8	Опыт 11	Опыт 12
Вид топлива	-	Еловые дрова	Березовые дрова	Осиновые дрова	Древесные брикеты	Пеллеты из ели	Кора ели	Торфяные брикеты
Масса порции	M, кг	1,34	1,42	1,43	1,42	1,40	0,90	1,40
Эквивалент. диметр/кол-во	$d_э$ /n; мм/шт	73/6	54/11	52/12	74/3	8/-	11/-	66/4
Влажность топлива	W_t^r, %	13,40	10,50	26,60	8,80	9,84	15,74	11,04
Зольность топлива	A^r, %	0,28	0,28	0,23	0,14	0,33	1,62	6,89
Выход летучих веществ	V^{daf}, %	85,6	85,3	85,0	85,87	85,01	81,10	70,05
Низшая теплота сгорания	Q^r_i, МДж/кг	15,99	16,05	12,61	17,18	16,66	16,56	15,81
Температура воздуха на входе в камин	$t_{хв}$, °С	26,0	30,0	26,5	26,8	28,5	26,4	28,0
Температура уходящих газов	$\vartheta_{ух}$, °С	297,2	321,2	341,5	352,8	402,5	402,0	311,7
Избыток воздуха в уходящих газах	$\alpha_{ух}$	4,96	8,38	4,97	4,95	5,49	3,74	6,20
Потери теплоты: с уходящими газами	q_2, %	48,07	61,84	55,29	52,86	66,76	45,57	66,01
с химнедожогом	q_3, %	1,64	3,27	4,00	2,74	2,76	1,10	1,28
с мехнедожогом	q_4, %	0,10	0,10	0,05	0,02	0,06	0,25	0,64
КПД камина брутто	η, %	50,19	34,78	40,65	44,37	30,42	53,08	32,08
Эмиссия NO_x	NO_x, мг/МДж	56	110	93	56	52	151	194
Эмиссия CO	CO, мг/МДж	1648	3147	3983	2660	2733	1002	1399

* Приведенные значения являются усредненными по циклу между загрузками топлива



а)



б)

Рис. 3. Тепловизионные и реальные снимки: *а* – камина; *б* – верхней части газохода

Энергетическое использование биотоплива и торфа в теплогенерирующих установках малой мощности для модульного домостроения является актуальным и перспективным направлением как региональной, так и государственной политики.

Литература

1. *Любов, В.К.* Повышение эффективности энергетического использования биотоплив / В.К. Любов, С.В. Любова. – Архангельск, 2010.

УДК 697.432

В.К. Любов, А.Н. Попов, О.Д. Мюллер

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ДРОВ В СТАЛЬНЫХ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛАХ

Рассмотрены основные результаты энергетического обследования водогрейных котлов, работающих на дровах.

Водогрейный котел, топка, дрова, оксиды азота и углерода, потери теплоты.

The paper considers the basic results of energy examination of hot water boilers working on woods.

Hot water boiler, furnace, fire-wood, nitrogen and carbon oxides, loss of heat.

В городах с небольшой плотностью застройки и населенных пунктах сельской местности эксплуатируется большое количество котельных малой мощности, оборудованных водогрейными котлами различных модификаций. Котлы коммунальной энергетики часто являются немеханизированными и обслуживаются вручную. Исследования по определению технико-экономических и экологических показателей работы объектов коммунальной энергетики в Архангельской области проводились на ограниченном ко-