

УДК 661.91+622.691.4

Мальшев В.С., к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», malyshevvs@tauniver.ru, Мурманск, Россия.

Пантилеев С.П., ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», pantileevsp@tauniver.ru, Мурманск, Россия.

ПОЛНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛА КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ ИЗ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ГАЗОВОЙ КОТЕЛЬНОЙ В ТЕПЛИЧНОМ ХОЗЯЙСТВЕ П. ТУЛОМА

Аннотация: В статье рассмотрена проблема использования тепла конденсации водяных паров из продуктов сгорания. Представлен вариант реконструкции системы теплоснабжения сельского поселения Тулома Мурманской области. Сделаны выводы о перспективности внедрения результатов исследования.

Ключевые слова: перевод котлов на природный, компримированный или сжиженный газ, теплоснабжение.

Требование перевода работы котлов на конденсационный режим работы поставлено министерством энергетики РФ уже 30 лет назад. Но при использовании мазута и угля, традиционных для многих регионов видов топлива, становится труднореализуемой задачей. В силу значительного содержания в них серы понижение температуры уходящих продуктов сгорания приведёт к ранней конденсации водяных паров и, как следствие возникновению низкотемпературной газовой коррозии. Стремление в таком случае перевести работу котлов на конденсационный режим работы потребует применения в дополнительных поверхностях нагрева более стойких к коррозии материалов. В таких случаях придется проводить технико-экономическое обоснование. На весах будут с одной стороны значительное уменьшение расхода топлива, а с другой – дополнительные и очень серьезные капитальные вложения.

Решение существенно упростится при переводе котлов на природный газ, компримированный или сжиженный. При этом появляется возможность полезного использования получаемого конденсата. При коэффициенте избытка воздуха в уходящих продуктах сгорания для природного газа $\alpha_{yx}=1,25\dots 1,35$ точка росы равна

55,3...54°C [7]. Таким образом, при сжигании 1 м³ природного газа, взятого далее для примера, выделяется 2,13 м³/м³ водяных паров и образуется 2,13·0,803=1,71 кг водяных паров (0,803 кг/м³ – плотность водяных паров). Если предположить, что мы сумели полезно охладить продукты сгорания до полной конденсации всех водяных паров, то мы дополнительно получим следующее количество тепла:

$\Delta Q_{\text{кон}} = 1,71 \cdot 2500 = 4276 \text{ кДж/м}^3$ (2500 кДж/кг – теплота конденсации водяных паров).

При этом теоретически КПД газового котла может увеличиться на величину:

$$\Delta \eta_{\text{кон}} = \Delta Q_{\text{кон}} / Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 4276 / 35590 = 0,1201 = 12,01\%.$$

Главная проблема в обеспечении конденсационного режима работы котла – это обеспечение котельной теплоносителем с температурой ниже точки росы водяных паров в продуктах сгорания, требующего нагрева. Такими теплоносителями могут быть: вода горячего водоснабжения при открытой системе теплоснабжения, питательная и подпиточная вода, идущая в систему водоподготовки и на покрытие утечек конденсата и сетевой воды, воздух, подаваемый в топку котла, воздух системы воздушного отопления административных помещений котельной, вода систем подогрева резервного топлива такого, как дизельное топливо, печное бытовое топливо (ТБП). Из всех перечисленных вариантов только открытые системы теплоснабжения позволяют почти полностью использовать тепло конденсации водяных паров из продуктов сгорания. При этом возникают проблемы с удалением охлаждённых сухих продуктов сгорания. Конденсационный режим работы котлов уже довольно широко применяется в небольших котельных, в которых используется низкотемпературная система отопления помещений, так называемые «тёплые полы». При этом появляется новая проблема, связанная с нейтрализацией кислотности образовавшегося конденсата. Она решается обработкой конденсата растворами щёлочи, что незначительно увеличивает солёность конденсата.

Проблеме использования тепла конденсации водяных паров из продуктов сгорания посвящено множество работ, выполненных в конце прошлого столетия и в начале нынешнего. За это время выполнено множество патентов на различные типы конденсационных утилизаторов тепла: контактных (смесительных) и

поверхностных. В статье мы остановимся на применении поверхностных конденсационных утилизаторов тепла. Большой вклад в разработку поверхностных конденсационных утилизаторов тепла внесли Кудинов А.А., Антонов В.А., Алексеев Ю.Н. Зиганшина С.К. в работах [3...6].

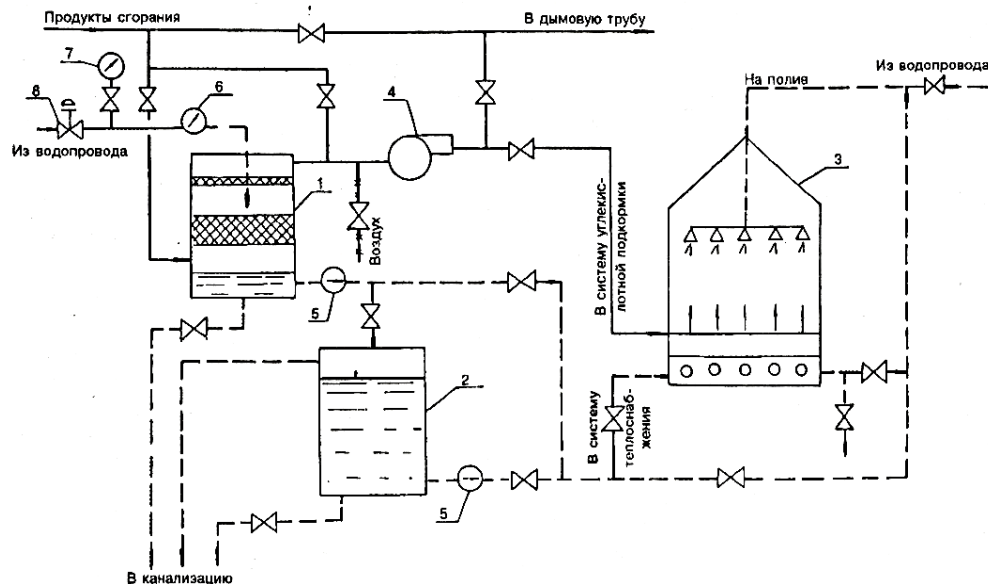


Рис. 1. Комплексная схема использования продуктов сгорания в тепличном хозяйстве совхоза г. Рязань:

1 – контактный экономайзер; 2 – бак-аккумулятор; 3 – теплица; 4 – дымосос; 5 – насос; 6 – расходомер; 7 – манометр; 8 – регулировочный вентиль

В работе [9] авторы предлагают использовать для теплиц, располагаемых на территории промышленных предприятий и котельных отходящие газы от технологического оборудования и котельных агрегатов, а также горячую воду или пар от технологического оборудования. Ими предлагается также использовать получаемую горячую воду в традиционных системах водяного отопления теплиц, а низкотемпературную воду – в контактных аппаратах для нагрева и увлажнения воздуха. Схема такой установки показана на рисунке 1.

В патенте [10] (см. рисунок 2) теплица содержит систему 1 обогрева шатра теплицы, подключенную к котлу 2, конденсационный поверхностный утилизатор 3 теплоты уходящих продуктов сгорания природного газа, установленный в основном газоходе и подключенный по водяному тракту к системе 4 подпочвенного обогрева

теплицы, сборник 5 конденсата продуктов сгорания природного газа, снабженный гидравлическим затвором 6, сепарационное устройство - каплеуловитель 7, систему газораспределения 8 теплицы, соединенную через фильтр 9 трубопроводом 10 с каналом 11 отвода продуктов сгорания в атмосферу и дополнительно трубопроводом 12 с генератором 13 углекислого газа, смесительную камеру 14 с газовой горелкой 15, бак-резервуар 16 обессоленной воды, насос 17, присоединенный по нагнетательной стороне трубопроводом 18 к оросительному устройству 19, снабженному специальными соплами 20.

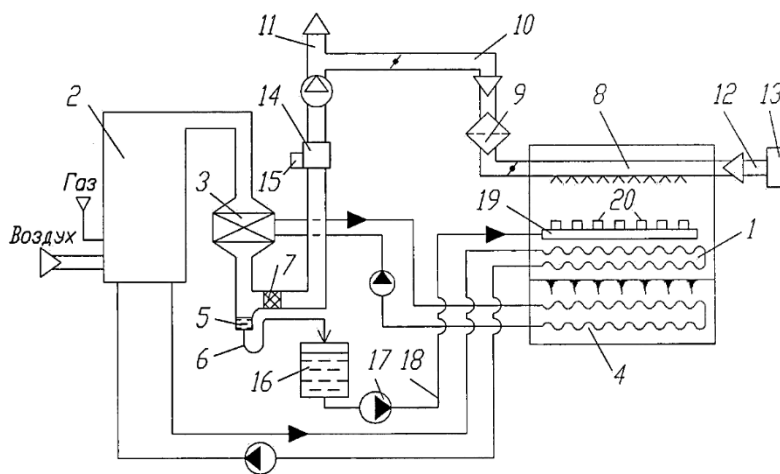


Рис. 2. Схема отопления и полива теплицы по патенту [10]

Эта схема предназначена для теплиц собственной котельной, в которой всё тепло, вырабатываемое котлом полностью используется для системы отопления теплицы. Кислотность конденсата никак не изменяется при поливе, что может неблагоприятно влиять на рост растений в теплице. При достаточно высокой концентрации углекислого газа в продуктах сгорания в патенте добавлены дополнительные устройства для получения углекислого газа при помощи сжигания природного газа.

Нами предлагается при газовой котельной организовать тепличное хозяйство с воздушным отоплением от воздухоподогревателя, работающего на уходящих ПС котлов котельной. В качестве примера рассмотрим вариант реконструкции системы теплоснабжения сельского поселения Тулома Мурманской области. В настоящее время теплоснабжение этого посёлка осуществляется от электрической котельной.

Присоединённая тепловая нагрузка 6,18Гкал/ч (7,2МВт). В перспективе, после перевода Мурманской области на природный газ, планируется перевод теплоснабжения посёлка на газ.

Рассмотрим тепловые балансы котельной. Нас интересует, какое количество тепла уходящих продуктов сгорания можно использовать для системы воздушного отопления предлагаемой теплицы.

При температуре с уходящими продуктами сгорания $t_{yx1}=100^{\circ}\text{C}$ и коэффициенте избытка воздуха $\alpha_1=1,05$ потери с уходящими продуктами сгорания составят:

$$q_{21}=I_{yx1}/Q_{\text{н}}^{\text{р}}=1525,65/35590=0,0429=4,29\%,$$

$$\text{где } I_{yx1}=I_{100}+(\alpha_1-1)I^{\text{в}}_{100}=1463+(1,05-1)1253=1525,65\text{кДж/нм}^3;$$

$I_{100}=1463\text{кДж/нм}^3$ – теоретическая энтальпия газов при 100°C (см. таблицу 2.1) (см. таблицу XVI [2]);

$I^{\text{в}}_{100}=1253\text{кДж/нм}^3$ – теоретическая энтальпия воздуха при 100°C (см. таблицу 2.1) (см. таблицу XVI [2])

Это без учёта тепла конденсации водяных паров из уходящих продуктов сгорания (ПС).

Как отмечалось ранее: $\Delta Q_{\text{кон}}=1,71\cdot 2500=4276\text{кДж/нм}^3$ (2500кДж/кг – теплота конденсации водяных паров).

В отопительный период при средней температуре наружного воздуха минус $3,2^{\circ}\text{C}$ уходящие ПС можно охладить до температуры близкой 0°C . Тогда можно снять из уходящие ПС следующее количество теплоты:

$$Q_{\text{общ}}=Q_{\text{охл}}+\Delta Q_{\text{кон}}=1525,65+4276=5802\text{кДж/нм}^3,$$

$$\text{где } Q_{\text{охл}}=I_{yx1}-I_{yx2}=1525,65-0=1525,65\text{кДж/нм}^3.$$

Средний расход топлива при тепловой нагрузке $Q_1=7,2\text{МВт}$, КПД котлов $\eta_{\text{к}}=0,92$ и КПД тепловой сети $\eta_{\text{ТС}}=0,8$ и низшей теплоте сгорания природного газа $Q_{\text{н}}^{\text{р}}=35,8\text{МДж/нм}^3$ составит:

$$V=Q_1/(Q_{\text{н}}^{\text{р}}\cdot \eta_{\text{к}}\cdot \eta_{\text{ТС}})=7,2/(35,8\cdot 0,92\cdot 0,8)=0,273\text{нм}^3/\text{с}.$$

Тепловая мощность воздухоподогревателя составит:

$$Q_{\text{ВП}}=\eta_{\text{ВП}}V\cdot Q_{\text{общ}}=0,8\cdot 0,273\cdot 5802=1268\text{кВт}.$$

Согласно [6] коэффициент теплопередачи при конденсации водяных паров в утилизаторе тепла уходящих ПС составляет $k=50\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Средний температурный напор в воздухоподогревателе $\Delta t=21^\circ\text{С}$.

Теплопередающая площадь воздухоподогревателя составит:

$$F = Q_{\text{ВП}} / (k \cdot \Delta t) = 1267 \cdot 10^3 / (50 \cdot 21) = 1206 \text{ м}^2.$$

Для трубы диаметром $d=300\text{х}3\text{мм}$ её длина составит:

$$L = F / (\pi \cdot d) = 1206 / (\pi \cdot 0,3) = 1280 \text{ м}$$

Это 30 труб по 40м с общим проходным сечением:

$$F_{\text{пр}} = 30 \pi \cdot d^2 / 4 = 10 \pi \cdot 0,3^2 / 4 = 2,121 \text{ м}^2.$$

Объемы продуктов сгорания (см. таблицу XVI [4]):

1. теоретически необходимое количество воздуха $V^0=9,44 \text{ нм}^3/\text{нм}^3$;
2. объем трехатомных газов $V^0_{\text{RO}_2} = 0,99 \text{ нм}^3/\text{нм}^3$;
3. объем водяных паров $V^0_{\text{H}_2\text{O}} = 2,13 \text{ нм}^3/\text{нм}^3$;
4. объем азота $V^0_{\text{N}_2} = 7,47 \text{ нм}^3/\text{нм}^3$.

Действительный объем водяных паров:

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}} &= V^0_{\text{H}_2\text{O}} + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0 = \\ &= 2,13 + 0,0161 \cdot (1,2 - 1) \cdot 9,44 = 2,16 \text{ нм}^3/\text{нм}^3. \end{aligned}$$

Теоретический объем продуктов сгорания:

$$V_{\Gamma}^0 = V^0_{\text{N}_2} + V^0_{\text{RO}_2} + V^0_{\text{H}_2\text{O}} = 7,47 + 0,99 + 2,13 = 10,59 \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$

Действительный объем продуктов сгорания при $\alpha = 1,2$:

$$\begin{aligned} V_{\Gamma} &= V_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0 + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0 = \\ &= 10,59 + (1,2 - 1) \cdot 9,44 = 12,48 \text{ нм}^3/\text{нм}^3. \end{aligned}$$

Скорость ПС на выходе из труб будет (при нормальных условиях):

$$w_2 = V \cdot V_{\Gamma} / F_{\text{пр}} = 0,273 \cdot 12,48 / 2,121 = 1,606 \text{ м/с}.$$

Скорость ПС на входе в трубы будет:

$$w_2 = (t_1 + 273) w_1 / (t_2 + 273) = (100 + 273) 1,606 / (10 + 273) = 2,19 \text{ м/с}.$$

Расход ПС при этом составит:

$$V_{\text{ПС}} = V \cdot V_{\Gamma} = 0,273 \cdot 12,4 = 3,385 \text{ нм}^3/\text{с}.$$

В приведенном расчете была рассмотрена рекуперативная система воздушного отопления теплицы. Можно также применить смесительную систему

отопления. Смешивать ПС и воздух чтобы температура смеси была 30°C. Теплоёмкости воздуха и ПС примерно одинаковы и тогда расход воздуха для образования смеси получим из уравнения теплового баланса:

$$100 V_{\text{ПС}} + 10 V_{\text{воз}} = 30 (V_{\text{ПС}} + V_{\text{воз}})$$

$$70 V_{\text{ПС}} - 20 V_{\text{воз}} = 0$$

$$V_{\text{воз}} = 70 \cdot 3,385 / 20 = 11,85 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Объёмная концентрация углекислого газа в ПС $0,99/12,48=0,08=8\%$ будет разбавляться воздухом с концентрацией 0,04% до величины равной:

$$(8 \cdot 3,385 + 0,04 \cdot 11,85) / (3,385 + 11,85) = 1,856\%.$$

Согласно [1] ПДК углерода диоксида (двуокиси углерода, углекислого газа) составляет: максимальная разовая - 27000 мг/м³ (5,2% объёмная), среднесменная - 9000 мг/м³ (1,7% объёмная).

Обычное объёмное содержание углекислоты в воздухе составляет 0,04%. Уменьшение содержания углекислоты в воздухе снижает интенсивность фотосинтеза. Повышение содержания углекислоты до 0,5% увеличивает интенсивность фотосинтеза почти пропорционально. Однако при дальнейшем повышении содержания углекислоты, интенсивность фотосинтеза не возрастает, а при уже 1% - растение страдает.

Показатель содержания CO₂ в ppm, при котором процесс образования сахаров в растении протекает хорошо, равен 1000 ppm - 1200 ppm (см. рисунок 3).

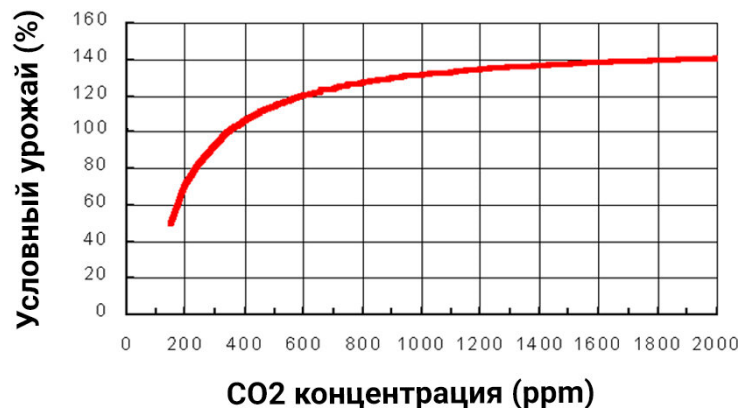


Рис. 3. График зависимости урожайности от концентрации CO₂

Достичь данных показателей в теплице легко можно на рассвете, при этом подача CO_2 будет минимальной. В течение дня данный показатель может быть достигнут максимальной отметки в 600–800 ppm при полной подачи CO_2 в теплицу, так как окна в теплице открыты и газ попросту выветривается через них.

Эти требования заставляют переходить на комбинированную схему воздушного отопления: смесительную часть для поддержания необходимой концентрации углекислого газа (0,6%) расходом ПС (0,6/1,856) $3,385=1,094$ $\text{м}^3/\text{с}$ смешивают с воздухом и направляют в теплицу, а остальные ПС направляют в трубы воздухоподогревателя. Это деление потока ПС необходимо автоматизировать от датчика концентрации углекислого газа в теплице. Схема отопления воздушного отопления показана на рисунке 4.

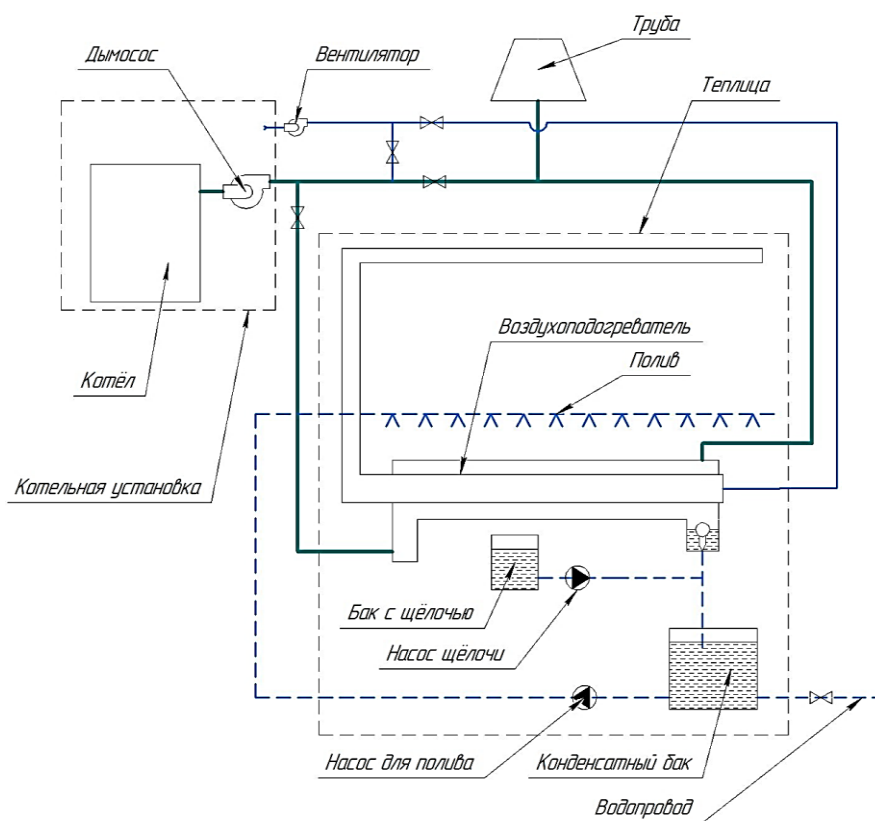


Рис. 4. Предлагаемая схема отопления и полива теплицы

Воздух в теплицу подавать вытяжным вентилятором котельной, который удаляет избыточное тепло, выделяемое горячими поверхностями

котлов и вспомогательного оборудования котельной (3...5% от тепловой мощности).

Конденсат из воздухоподогревателя через конденсационный горшок сливается в конденсационный бак. Туда же в зависимости от кислотности конденсата подаётся щёлочь насосом из бака щёлочи.

Полив растений в теплице проводится из конденсационного бака, который подключён к водопроводу, работающего при нехватке конденсата, а при избытке конденсат через перелив сливается в канализацию.

Использование для отопления теплицы воздуха котельной и тепла уходящих ПС и для полива конденсата ПС позволят значительно уменьшить удельные расходы на производство овощей в теплице. При этом ПС после воздухоподогревателя осушенными попадают в дымовую трубу, что тоже хорошо влияет на её работу.

Диапазон мощности обогрева теплиц достаточно широкий:

для одинарного остекления — 70–120 Вт/м²;

для двойного остекления — 50–100 Вт/м².

Для двойного остекления при этой тепловой мощности полезная площадь теплицы составит:

$$S=1268 \cdot 10^3 / 100=12680 \text{ м}^2.$$

Огурцы являются влаголюбивыми растениями. Если воды недостаточно, то хорошего урожая не будет. Растения в теплице поливают 1 раз в 2 или 3 дня. На 1 квадратный метр затрачивается до 15 л воды в сутки (общая потребность воды для полива $0,015 \cdot 12680=190 \text{ кг/сут}$). Она не должна быть слишком холодной. Урожайность огурцов с 1 м² в год 9...50 кг. Со всей теплицы 9000...50000 кг по цене 100 рублей за 1 кг можно получить доход 0,9...5 миллионов рублей.

Можно также полезно использовать конденсат из ПС с расходом:

$$1,71 \cdot 0,273=0,467 \text{ кг/с}=1681 \text{ кг/ч}=40,35 \text{ т/сут.}$$

Такой расход полностью покрывает потребности воды для полива и может быть использован для подпитки котлов котельной и тепловой сети системы теплоснабжения.

Конденсат забирает в себя часть углекислого газа из ПС и становится кислым до pH 3...4 и требует нейтрализации. Аммиак обладает большей растворимостью, чем углекислый газ, и поэтому полностью растворяется в конденсате [11]. Он в контакте с подкислённым конденсатом (слабый раствор угольной кислоты) превращается в гидроокись аммония NH_4OH , которая легко распадается в конденсате на усвояемые растениями компоненты NH_4 и NO_3 . Таким образом, частично или полностью может быть покрыта потребность в азотных удобрениях, необходимых для выращивания растений.

Список использованных источников

- 1 Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.2100-06 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны" и Дополнению N 2 к ГН 2.2.5.1313-03
2. Тепловой расчёт котлов (нормативный метод). -3-е изд., переработанное и дополн. Изд. НПОЦКТИ. – СПб.: 1998. -266с.: ил.
3. Кудинов А.А., Антонов В.А., Алексеев Ю.Н. Анализ эффективности применения конденсационного теплоутилизатора за паровым котлом ДЕ-10-14 ГМ // Промышленная энергетика. 1997. №8. С. 8—10.
4. Кудинов А.А., Антонов В.А., Алексеев Ю.Н. Энергосбережение в газифицированных котельных установках путем глубокого охлаждения продуктов сгорания // Теплоэнергетика. 2000. №1. С. 59—61.
5. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Охлаждение продуктов сгорания природного газа в конденсационных теплоутилизаторах // Промышленная энергетика. 2010. №4. С. 39—43.
6. Кудинов А. А., Зиганшина С. К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. М.: Машиностроение, 2011. — 374 с., ил. 117.

7. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. Л.: Недра, 1990. 280 с.
8. Шанин Б.В., Новгородский Е.Е., Широков В.А., Пужайло А.Ф. Энергосбережение и охрана воздушного бассейна при использовании природного газа: Учебное пособие, Н. Новгород: Нижегородский гос. архит.-строит. ун-т, 1998. – 384 с.
9. Использование продуктов сгорания природного газа в тепличном хозяйстве и возможности экономии тепловой энергии в теплицах Иванова А.В., Колесникова П.А., Готулева Ю.В. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет Нижний Новгород, Россия. Код доступа: <https://files.scienceforum.ru/pdf/2022/61bc792c52d16.pdf>
10. Патент РФ № 2736221 Способ работы теплицы, авторы Кудинов Анатолий Александрович, Зиганшина Светлана Камиловна, Демина Юлия Эрнестовна. Опубликовано: 12.11.2020 Бюл. № 32. 6с. Код доступа: <https://patenton.ru/patent/RU2736221C1.pdf>
11. Патент РФ № 2192120 Способ подкормки растений в теплицах углекислым газом и азотными удобрениями. Авторы Хазанова С.Г. и Хазанов Е.Е. Опубликовано 10.11.2002. Код доступа: https://patents.s3.yandex.net/RU2192120C2_20021110.pdf

Malyshev V.S., PhD, Associate Professor, Murmansk Arctic University, malyshevvs@mauniver.ru, Murmansk, Russia.

Pantileev S.P., Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Murmansk Arctic University", pantileevsp@mauniver.ru, Murmansk, Russia.

FULL UTILIZATION OF THE HEAT OF CONDENSATION OF WATER VAPOR FROM COMBUSTION PRODUCTS OF THE GAS BOILER IN THE GREENHOUSE FARM OF P. TULOMA

Abstract: The article considers the problem of using the heat of condensation of water vapor from combustion products. A variant of reconstruction of the heat supply system of the rural settlement of Tuloma in the Murmansk region is presented. Conclusions are made about the prospects of implementing the research results.

Keywords: conversion of boilers to natural, compressed or liquefied gas, heat supply.