

УДК 621.311

**М. Н. Чепурной, к. т. н., доц.; Н. В. Резидент, к. т. н., доц.; Т. М. Олексина;
Ю. К. Возиян**

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ГАЗОВ ИЗ КОТЛОВ В УТИЛИЗАТОРАХ КОНТАКТНОГО ТИПА

Проанализированы закономерности изменения интенсивности утилизации теплоты уходящих из котлов газов за счет «сухого» и конденсационного теплообмена в контактных утилизаторах. Получены удобные формулы для вычисления тепловой мощности утилизации. Определена экономия газа за счет утилизации в некоторых паровых и водогрейных котлах. В соответствии с этой экономией оценено уменьшение вредных выбросов в атмосферу.

Ключевые слова: уходящие газы, контактный утилизатор, температура точки росы, паровой котел, водогрейный котел.

Введение

Из-за сложностей поставок природного газа и повышения его стоимости стратегической задачей является экономия этого вида топлива. Одним из приоритетных средств экономии природного газа является использование низкотемпературной сбросной теплоты продуктов сгорания в топливоиспользующих установках, в том числе в паровых и водогрейных котлах.

Энергетические уровни тепловых отходов от промышленных и отопительных котлов, по экспертным оценкам, составляют почти 45% общего объема топливно-энергетических ресурсов [1]. В областных и районных центрах Украины работают многочисленные промышленные и водогрейные котельные, оборудованные котлами небольшой мощности, рабочим топливом в которых является природный газ. Такие котлы, как правило, не имеют развитых хвостовых поверхностей нагрева и характеризуются относительно высокой температурой уходящих газов ($t_{г2} > 130^\circ \text{C}$).

Продукты сгорания природного газа содержат высокую концентрацию водяного пара, на образование которого потрачена определенная доля теплоты сгорания топлива. С помощью утилизаторов теплоты контактного типа (контактных утилизаторов) температуру уходящих газов из котлов можно уменьшить до температуры, которая меньше температуры точки росы t_R , то есть $t_{г2} < t_R$. Это позволяет использовать как физическую (сухую), так и конденсационную (влажностную) составляющие теплоты уходящих газов.

Утилизируемую теплоту уходящих газов, как правило, используют вне котла в определенном элементе тепловой схемы котельной, например, для подогрева сырой или химочищенной воды. Благодаря теплоте, утилизируемой в контактном утилизаторе, уменьшается расход теплоты на собственные нужды котла, вследствие чего уменьшается тепловая производительность котла, которая и обуславливает уменьшение расхода рабочего топлива в котле. В результате достигают определенной экономии топлива. Уменьшение расхода топлива предопределяет некоторое уменьшение вредных выбросов в атмосферу, а также уменьшение затрат электроэнергии на привод тягодутьевых установок.

Учитывая вышеизложенное, были поставлены задачи: определить общие закономерности изменения составляющих утилизаций уходящих газов; оценить эффективность использования утилизируемой теплоты в котлах различного типа.

Основные результаты

Работу котла в номинальных режимах характеризуют почти неизменные значения коэффициентов избытка воздуха в топке и в уходящих газах, температур уходящих газов и хо-

лодного (в помещении) воздуха, а также тепловые потери от химической неполноты сгорания топлива q_3 и в окружающую среду q_5 . Наибольшая тепловая потеря с уходящими газами q_2 , как известно [2 – 5], зависит от температур уходящих газов и холодного воздуха, коэффициента избытка воздуха в уходящих газах. Вместо сложных вычислений удельных объемов продуктов сгорания топлива и их энтальпий, необходимых для определения q_2 по нормативному методу, используют более упрощенные формулы [2, 3]. На основании данных о составе и свойствах природных газов различных месторождений с теплотой сгорания на сухую массу 31 – 37,9 МДж/м³ [4, 6] получена обобщенная формула для вычисления $q_2\%$, которая с точностью $\pm 0,14\%$ согласуется со значениями q_2 , вычисленными по нормативному методу [4]:

$$q_2 = [(0,0343 \cdot \alpha_{y_2} + 0,00782) t_{y_2} - \exp(0,4324 \cdot \alpha_{y_2} - 0,3746)] \theta^{0,33}, \quad (1)$$

где α_{y_2} – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах; $\theta = [293 / (t_{x_6} + 375)]$; t_{x_6} – температура холодного воздуха.

Для упрощения расчетов на рис. 1 приведены зависимости $q_2 = f(\alpha_{y_2}, t_{y_2})$ при $\theta = 1$

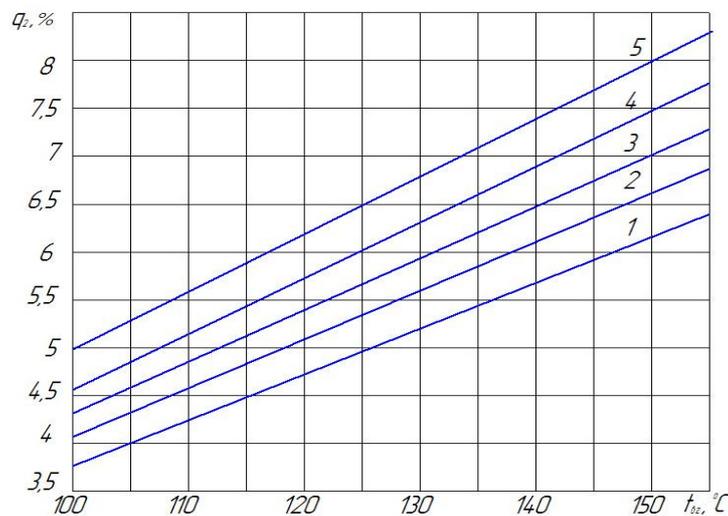


Рис. 1. Значение q_2 : 1- $\alpha_{y_2} = 1,2$; 2-1,3; 3-1,4; 4-1,5; 5-1,6

Для заданной тепловой мощности котла Q_k расход рабочего топлива равен, м³ / с

$$B_p = Q_k / (Q_n^c \cdot \eta_k), \quad (2)$$

где Q_n^c – теплота сгорания природного газа на сухую массу, МДж / м³; η_k – коэффициент полезного действия (КПД) котла.

Тепловую мощность, утилизируемую в контактном утилизаторе за счет «сухого» теплообмена вычисляют по формуле, МВт [7].

$$Q_c = Q_{нал} (1 - \eta_k) \psi_c, \quad (3)$$

где $Q_{нал} = B_p \cdot Q_n^c$ – тепловая мощность сожженного топлива; $\psi_c = (t_{o_2} - t_{к_у}) / t_{o_2}$ – коэффициент утилизации теплоты за счет «сухого» теплообмена; $t_{к_у}$ – температура дымовых газов на выходе из контактного утилизатора.

Закономерности изменения коэффициента утилизации ψ_c показаны на рис. 2.

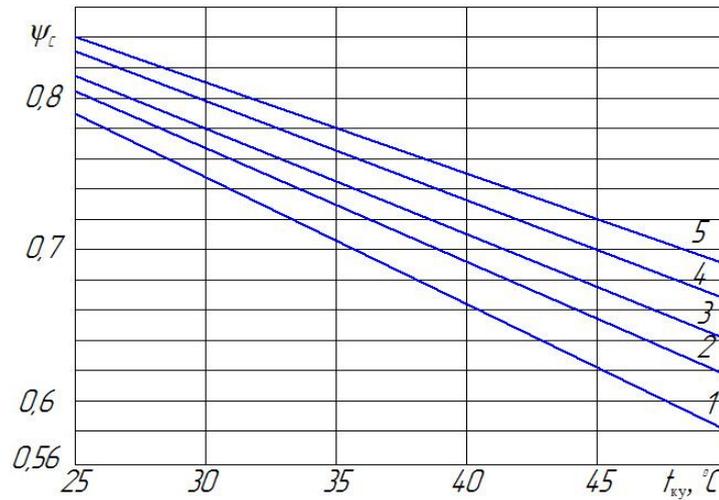


Рис. 2. Значение коэффициента утилизации теплоты за счет «сухого» теплообмена:
1- $t_{oz} = 120$ °C; 2-130;3-140; 4-150; 5-160

Из рис. 2 видно, что интенсивность «сухого» теплообмена линейно уменьшается с уменьшением температуры уходящих газов и температуры газов за контактном утилизатором (с уменьшением степени охлаждения газов) в контактном утилизаторе.

Зависимости, приведенные на рис. 2, аппроксимируются формулой

$$\psi_c = 1 - (0,6143 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot t_{ye}) \cdot t_{ky}, \quad (4)$$

На рис. 3 приведены расчетные значения удельного ($Q_{нал} = 1$ МВт) утилизационной мощности q_c за счет «сухого» теплообмена в контактном утилизаторе.

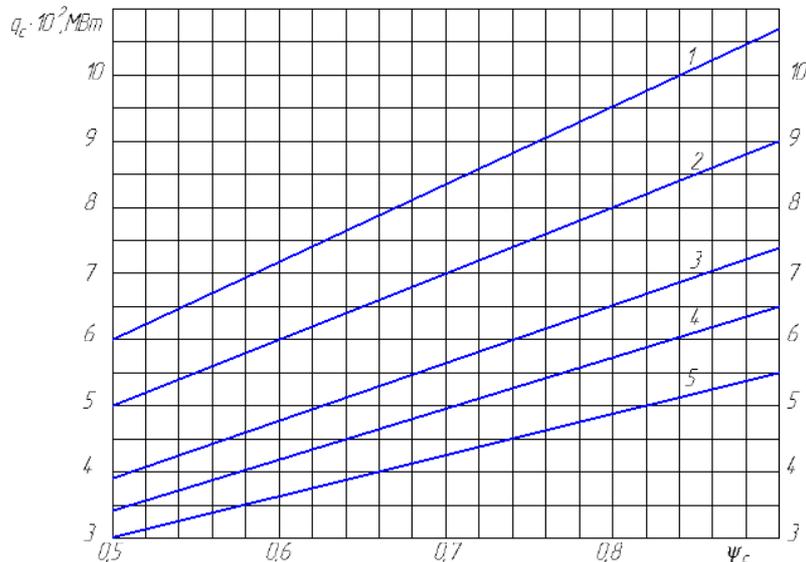


Рис. 3. Зависимости $q_c = f(\psi_c, \eta_k)$ для «сухого» теплообмена: 1- $\eta_k = 0,88$; 2-0,9; 3-0,92; 4-0,94; 5-0,96

Утилизационная мощность за счет «сухого» теплообмена линейно возрастает с увеличением коэффициента утилизации ψ_c и уменьшением КПД котла.

Тепловая мощность, утилизируемая в контактном утилизаторе за счет конденсации водяного пара из продуктов сгорания топлива, составляет

$$Q_{кн} = B_p(Q^c_{г} - Q^c_{н}) \psi_{кн} = B_p \cdot Q^c_{н}(Q^c_{г}/Q^c_{н} - 1) \psi_{кн} = Q_{мон}(Q^* - 1) \psi_{кн}, \quad (5)$$

где $Q^c_{г}$ – высшая теплота сгорания рабочего топлива, превышающая низкую теплоту сгорания на теплоту конденсации водяного пара; $\psi_{кн} = (t_R - t_{кв}) / t_R$ – конденсационный коэффициент утилизации теплоты; $Q^* = Q^c_{г} / Q^c_{н}$.

Температура точки росы t_R может быть определена по [10, 17] °С.

$$t_R = 117,5 \cdot \alpha_{вз}^{-0,155} - 57,09. \quad (6)$$

Отношение Q^* для газообразных топлив, по данным [10, 11], составляет 1,111 – 1,1124. В контактных утилизаторах температура точки росы увеличивается за счет увеличения объемной доли водяного пара в уходящих газах. Кроме того, повышение влагосодержания позволяет получить дополнительный эффект в виде уменьшения выбросов оксидов азота в атмосферу [10, 17].

Расчетные значения коэффициентов утилизации теплоты за счет конденсации водяного пара приведены на рис. 4.

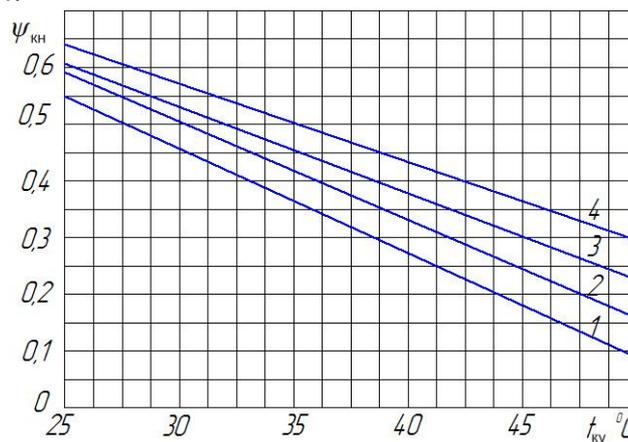


Рис. 4. Закономерности изменения коэффициентов конденсационной составляющей утилизации теплоты в уходящих газах: 1- $t_R = 55^\circ\text{C}$; 2-60; 3-65; 4-70

Из рис. 4 видно, что характер изменения коэффициентов $\psi_{кн}$ аналогичный характеру изменений коэффициентов ψ_c , приведенных на рис. 2. Основное влияние на интенсивность теплообмена за счет конденсации водяного пара, так же как и на рис. 2, оказывает температура газов за контактном утилизатором, с увеличением которой значения $\psi_{кн}$ уменьшается, а с увеличением температуры точки росы интенсивность конденсационной составляющей теплообмена возрастает.

Зависимости на рис. 4 аппроксимируются соотношением

$$\psi_{кн} = 1 - (0,02656 - 1,554 \cdot 10^{-4} \cdot t_R) t_{кв} \quad (7)$$

Несложно увидеть, что формула (7) по структуре аналогична формуле (4), но для одинакового интервала изменения температур газов за контактном утилизатором значения коэффициентов ψ_c превышают $\psi_{кн}$.

На рис. 5 приведены расчетные значения удельной мощности конденсационной составляющей теплообмена в уходящих газах $q_{кн}$ для $Q_{мон} = 1$ МВт.

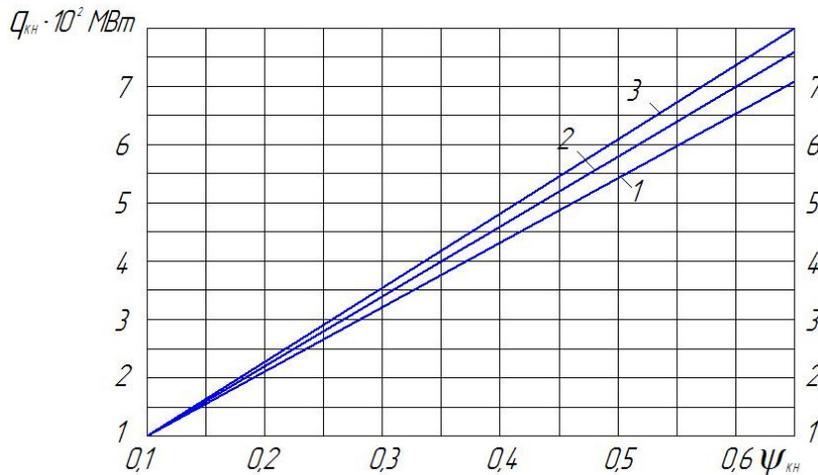


Рис. 5. Зависимости изменения удельной мощности за счет конденсационного теплообмена в уходящих газах: 1- $Q^* = 1,111$; 2-1,118; 3-1,124

Утилизационная мощность за счет конденсационного теплообмена в уходящих газах возрастает по мере повышения коэффициентов утилизации $\psi_{кн}$ и Q^* . Более существенное расхождение значений $q_{кн}$ наблюдают при $q_{кн} > 0,25$. По абсолютным величинам значения $q_{кн}$ меньше значений q_c .

Суммарная величина мощности, которая утилизируется в контактном утилизаторе, равна

$$Q_{ку} = B_p \cdot Q_n^c (q_c + q_{кн}) = Q_{мон} (q_c + q_{кн}). \quad (8)$$

Мощность утилизации, используемой в определенном теплообменном аппарате тепловой схемы котельной, будет составлять

$$Q_{ум} = Q_{ку} \cdot \eta_{то}, \quad (9)$$

где $\eta_{то}$ – КПД данного теплообменника.

В случае использования сбросной тепловой мощности, тепловая мощность котла должна уменьшиться на эту величину и будет равна

$$Q'_к = Q_к - Q_{ум}. \quad (10)$$

Если пренебречь незначительным изменением потери теплоты в окружающую среду, экономия рабочего топлива составит:

$$\Delta B_p = Q_{ум} / (Q_n^c \cdot \eta_к). \quad (11)$$

Как отмечалось ранее, уменьшение расхода топлива в котле обуславливает уменьшение электрической мощности на приводы тягодутьевых установок (вентилятора и дымососа), а также уменьшение вредных выбросов в атмосферу.

Итак, получены простые и удобные для инженерной практики формулы для расчетов пол-

ной мощности утилизации и экономии топлива в случае применения утилизации теплоты уходящих газов в контактных утилизаторах. На основании полученных результатов в качестве примера рассчитаны показатели работы некоторых паровых и водогрейных котлов с утилизацией теплоты уходящих газов. В расчетах температура точки росы и температура газов за контактным утилизатором составляет 56 °С и 40 °С соответственно. Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах выбран равным 1,28. Топливо – природный газ, теплота сгорания которого на сухую массу 33,4 МДж / м³, а теоретические объемы воздуха и продуктов сгорания составляют 9,52 и 10,62 м³ / м³, соответственно. Отношение высшей теплоты сгорания к низшей выбрано равным 1,112. Для определения температуры уходящих газов и тепловых потерь q_3 и q_5 использовали литературные источники [5, 6, 12], а также режимные карты котлов, которые работают на промышленных и отопительных котельных г. Винницы. Напор и КПД тягодутьевых установок составлял: 3,2 и 0,7 для вентилятора и 2,5 и 0,65 для дымососа, КПД теплообменника равен 0,98. Годовой срок работы котлов составляет 7800 ч. Расчеты тепловых схем котельных изложены в [13]. Выбросы вредных веществ в атмосферу определяли ГДК 34.02.305.-2002 "Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок". Тип котлов и показатели их работы сведены в таблицу.

Показатели работы котлов с утилизацией теплоты уходящих газов

Показатели	Тип котла			
	ДКВР-20-13-250	БГ-35	КОЛВИ 10000	ПТВМ-90
Тепловая мощность котла, МВт	14,02	26,25	10	34,86
Температура уходящих газов, °С	150	130	145	155
Потеря теплоты с уходящими газами, %	7,02	5,92	6,71	7,27
Потеря теплоты в окружающую среду, %	1,3	1,1	1,55	0,95
Потеря теплоты от химического недожега, %	0,03	0,022	0,025	0,02
Коэффициент полезного действия	0,9165	0,9295	0,9171	0,9176
Расход рабочего топлива, м ³ /с	0,4580	0,8455	0,3264	1,1374
Тепловая мощность сгораемого топлива, МВт	15,297	28,2397	10,9017	37,9891
Коэффициент утилизации для «сухого» теплообмена	0,7333	0,692	0,724	0,7419
Удельная мощность «сухого» теплообмена, МВт	0,0612	0,04878	0,0600	0,06113
Коэффициент утилизации для конденсационного теплообмена	0,3103	0,3103	0,3103	0,3103
Удельная мощность конденсационного теплообмена, МВт	0,0372	0,0372	0,0372	0,0372
Мощность, утилизированная в контактном утилизаторе, МВт	1,505	2,428	1,0596	3,735
Экономия рабочего топлива: м ³ /с %				
	0,04818 10,5	0,0782 9,25	0,0339 10,386	0,1194 13,01
Годовая экономия рабочего топлива, тыс·м ³	1352,89	2195,85	951,91	3352,75
Уменьшение мощностей приводов тягодутьевых установок, кВт	6,28	9,72	4,48	12,25

Продолжение табл.

Годовая экономия электроэнергии, МВт·час	48,984	75,816	34,944	95,55
Годовое уменьшение вредных выбросов в атмосферу, тонн: оксид углерода оксидов азота парникового газа (CO ₂)				
	8,935	14,720	6,291	21,727
	264,14	414,53	185,99	664,54
	1805,74	2923,34	1273,23	4432,89

Приведенные результаты свидетельствуют о целесообразности применения утилизации

уходящих газов от паровых и водогрейных котлов, работающих на газообразном топливе. В результате утилизации достигают экономии рабочего топлива, уменьшения расходов электроэнергии на собственные нужды котельной установки и уменьшения загрязняющих выбросов в атмосферу. Эффективность утилизации может быть повышена за счет увеличения температуры точки росы. Если в котельной работает не один, а два или более котлов, то расходы на топливо, электроэнергию и вредные выбросы могут быть существенно уменьшены. В зависимости от мощности два или более котлов могут работать на единую утилизационную установку, что значительно сокращает срок ее окупаемости [9, 14, 15, 16].

Полученные результаты являются необходимой предпосылкой для выбора типа контактных утилизаторов и экспресс-оценки эффективности применения утилизации уходящих газов из котлов.

Выводы

1. Получены удобные для инженерной практики формулы для определения потерь теплоты с уходящими газами в котлах, коэффициентов, характеризующих интенсивность утилизации теплоты за счет «сухого» и конденсационного теплообмена.

2. Выявлено, что основными факторами, определяющими интенсивность утилизации теплоты уходящих газов, являются: температура уходящих газов, температура газов за контактным утилизатором и температура точки росы.

3. Установлено, что в процессе утилизации теплоты уходящих газов от котлов можно достичь экономии рабочего топлива в пределах 9,25 – 13%, а также уменьшения затрат электроэнергии на собственные нужды и уменьшения вредных выбросов в атмосферу.

4. Результаты исследований могут быть использованы для выбора типа контактного утилизатора и оценки эффективности применения утилизации теплоты уходящих газов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ефимов А. В. Система глубокой утилизации теплоты газов, уходящих из котельных агрегатов / А. В. Ефимов; А. Л. Гончаренко, Л. В. Гончаренко // Вісник НТУ "ХПІ". – 2013. – N 13. – С. 73 – 80.
2. Равич М. В. Эффективность использования топлива / М. Б. Равич. – М. : Наука, 1977. – 344 с.
3. Данилов Е. А. Контроль сжигания топлива в промышленных котельных установках / Е. А. Данилов, В. Н. Клочков. – К. : Техніка, 1988. – 166 с.
4. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / [под ред. Г. М. Кагана]. – СПб : Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
5. Чепурний М. М. Теплові розрахунки парогенераторів / М. М. Чепурний, Д. В. Степанов, Є. С. Корженко. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 154 с.
6. Теплотехнический справочник / [под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева]. – Т. 1. – М.: Энергия, 1975. – 744 с.
7. Клименко В. Н. Некоторые особенности применения парокompрессионных тепловых насосов для утилизации сбросной теплоты отопительных котлов / В. Н. Клименко // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33. – N 5. – С. 43 – 48.
8. Бакластов А. М. Проектирования монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок / А. М. Бакластов. – М. : Энергия, 1970. – 568 с.
9. Чепурний М. М. Розрахунки тепломасообмінних апаратів / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 130 с.
10. Семенюк Л. Г. Получение конденсата при глубоком охлаждении продуктов сгорания / Л. Г. Семенюк // Промышленная энергетика, 1987. – N 8. – С. 47 – 50.
11. Жовмір М. М. Утилізація низькотемпературної теплоти продуктів згорання палива за допомогою теплових насосів / М. М. Жовмір // Промышленная теплотехника, 2008. – Т. 30. – N 2. – С. 90 – 97.
12. Гольстрем В. А. Справочник энергетика промышленных предприятий / В. А. Гольстрем, А. С. Иваненко. – К. : Техніка, 1982. – 561 с.
13. Ткаченко С. Й. Розрахунки теплових схем і основи проектування джерел теплопостачання / С. Й. Ткаченко, М. М. Чепурний, Д. В. Степанов. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 137 с.
14. Таубман Е. И. Контактные теплообменники / Е. И. Таубман, В. А. Корнев, В. А. Мельтцев. – М. : Химия, 1987. – 256 с.

15. Гершуни А. Н. Разработка и внедрение эффективных утилизаторов на основе теплопередающих элементов испарительно-конденсационного типа / А. Н. Гершуни, В. П. Нищик // Промышленная теплотехника, 1977. – Т. 19. – № 3. – С. 69 – 73.
16. Баскаков А. П. Основные факторы, определяющие эффективность глубокого охлаждения продуктов сгорания в газифицированных котельных / А. П. Баскаков, Е. В. Ильина // Промышленная энергетика. – 2004. – № 4. – С. 46 – 49.
17. Аронов И. З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И. З. Аронов. – Л. : Недра, 1990. – 280 с.

Чепурной Марк Николаевич – к. т. н., доцент, профессор кафедры теплоэнергетики.

Резидент Наталия Владимировна – к. т. н., доцент кафедры теплоэнергетики.

Олексина Татьяна Михайловна – студентка института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Возиян Юлия Константиновна – студентка института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Винницкий национальный технический университет.