

ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ

УДК 697.353.2

А. А. Олексюк, И. Г. Шитикова, Н. В. Долгов

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
г. Макеевка

ОЦЕНКА РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ОТ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ С ПОДОГРЕВАТЕЛЬНО- АККУМУЛЯТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Рассмотрена саморегулирующаяся система теплоснабжения от индивидуальных тепловых пунктов с подогревательно-аккумуляторной установкой и теплообменниками змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения. Термодинамическая эффективность работы теплообменных аппаратов зависит от многих параметров и факторов, таких как: тепловая мощность, расход и качество теплоносителя, техническое назначение и конструктивное исполнение, направление движения теплоносителей, наличие и качество тепловой изоляции.

Эксергетический метод позволяет дать оценку полноты использования переноса теплоты между теплоносителями и оценку полноты использования ее термической, энергетической, механической и гидродинамической полезности.

Формулировка проблемы

В связи с увеличением расхода теплоты от центральных тепловых пунктов и переходом части потребителей на индивидуальное отопление, необходимо научное и экономическое обоснование направлений повышения эффективности независимых систем отопления и горячего водоснабжения от подогревательно-аккумуляторных установок (ПАУ) с трехконтурными теплообменниками (ТО) змеевикового типа на индивидуальных тепловых пунктах (ИТП). Такие теплообменники должны иметь четкую градацию относительно соотношения их диаметров и длины конструкции в зависимости от тепловой нагрузки в системах отопления и горячего водоснабжения.

Анализ последних исследований и публикаций

Опытно-экспериментальный стенд позволяет проводить исследования многоконтурных теплообменников с целью их оптимизации для зданий различной конструкции, назначения и этажности. В данном случае проводятся исследования ПАУ с многоконтурным ТО змеевикового типа как для независимой системы отопления, так и для системы горячего водоснабжения.

Оба змеевика размещены в корпусе ТО отдельно, как это показано на рисунке 1. При установившихся расходах и температурах теплоносителей производится снятие показаний параметров греющего и нагреваемых теплоносителей второго и третьего контуров. Для минимизации влияния случайных погрешностей и увеличения точности измерений опыты дублировались и заносились в журнал наблюдений. Таким образом были определены полнота использования переноса теплоты между теплоносителями и полнота использования ее термической, энергетической, механической и гидродинамической полезности.

Цели

Повышение эффективности работы и эксплуатации теплоснабжающих систем за счет разработки и внедрения новых ресурсосберегающих технологий и установок на сегодня является довольно актуальной научно-технической проблемой. Для достижения эффективной работы теплообменников необходим максимальный перенос тепловой энергии от первичного теплоносителя к вторичным.

Целями являются определение отношения между повышением температуры греющего теплоносителя и увеличением потерь эксергии в окружающую среду, определение эксергетического КПД, а также исследование научной модели бакааккумулятора с теплообменниками змеевикового типа.

Основной материал

Создание компактных подогревательно-аккумуляторных установок с трехконтурными теплообменниками змеевикового типа для индивидуальных тепловых пунктов становится определяющим в решении важной проблемы энергоресурсосбережения в системах централизованного теплоснабжения.

Для достижения эффективной работы теплообменников необходимо обеспечить максимальный перенос тепловой энергии от первичного теплоносителя к вторичным.

Рассмотрим саморегулирующуюся систему теплоснабжения от ИТП с ПАУ с теплообменниками змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения, представленную на рисунке 1.

Энергетический баланс ПАУ с многоконтурным теплообменником для систем отопления и горячего водоснабжения, согласно рисунка 1, запишем в виде уравнения

$$Q_{1c} = Q'_2 + Q'_3 + Q_{III}, \quad (1)$$

где Q'_2 – количество теплоты, передаваемое первичным теплоносителем в местную систему отопления, кДж/с:

$$Q'_2 = G'_2 \cdot c_{p2} (\tau'_1 - \tau''_2), \quad (2)$$

$Q'_{ГВ}$ – количество теплоты, передаваемое первичным теплоносителем, в систему горячего водоснабжения, кДж/с:

$$Q'_5 = G'_5 \cdot c_{p3} (\tau'_1 - \tau''_1), \quad (3)$$

Q_{III} – тепловые потери в окружающую среду, можно принять для ПАУ $Q_{III} = 0,01Q_1$.

Расчетные расходы первичного теплоносителя на отопление и горячее водоснабжение $G'_2, G'_3, \sum G'$ определяется из уравнений (1, 2, 3) и приведены на рисунке 2.

Теплота, воспринимаемая теплоносителем, циркулирующим в отопительном контуре, кДж/с:

$$Q''_2 = G''_2 \cdot c_{p20} (t'_2 - t''_2). \quad (4)$$

Теплота, воспринимаемая водопроводной водой для системы горячего водоснабжения, кДж/с:

$$Q''_3 = G''_3 \cdot c_{p3} (t'_3 - t''_3). \quad (5)$$

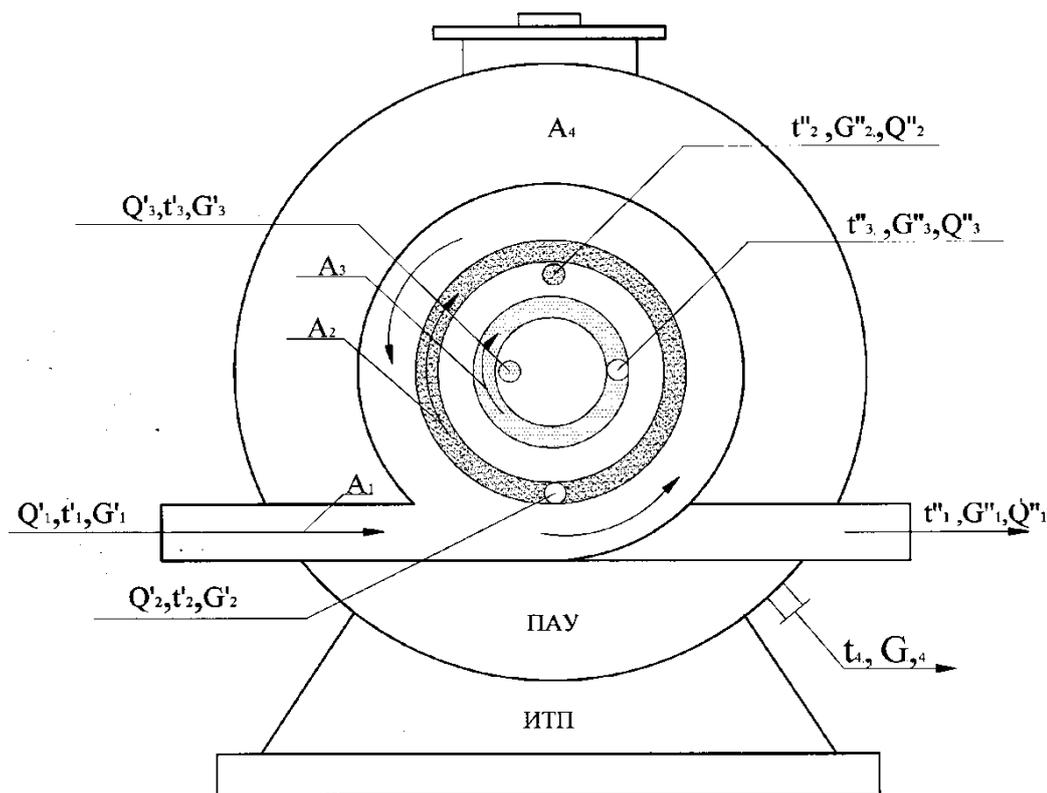


Рисунок 1 – Саморегулирующаяся система теплоснабжения от ИТП с ПАУ и теплообменником змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения

Уравнение теплового баланса для многоконтурного теплообменника принимает вид:

$$\sum G \cdot c_{p1} (\tau'_1 - \tau''_1) = G''_2 \cdot c_{p2} (t'_2 - t''_2) + G''_3 \cdot c_{p3} (t'_3 - t''_3) + Q_{ИТП} \quad (6)$$

Эффективность переноса теплоты от греющего теплоносителя $\sum G$ к нагреваемым для систем отопления G''_2 и горячего водоснабжения G''_3 в змеевиковом теплообменнике ПАУ можно определить с помощью термического КПД по выражению

$$\begin{aligned} \eta_t &= \frac{Q''_2 + Q''_3}{Q_1} = \frac{G''_2 \cdot c_{p2} (t'_2 - t''_2) + G''_3 \cdot c_{p3} (t'_3 - t''_3)}{\sum G \cdot c_{p1} \cdot (\tau'_1 - \tau''_1)} = \\ &= \frac{G''_2 \cdot c_{p2} \cdot \Delta t_2 + G''_3 \cdot c_{p3} \cdot \Delta t_3}{\sum G \cdot c_{p1} \cdot \Delta \tau_1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\sum G, G'_2$ и G'_3 – массовые расходы греющих теплоносителей, кг/с, связанные зависимостью:

$$\sum G = G'_2 + G'_3; \quad (8)$$

c_{p1}, c_{p2}, c_{p3} – теплоемкости теплоносителей; определяются по средней температуре соответствующего контура, кДж/(кг·°С);

t'_1, t''_1 – температуры греющего первичного теплоносителя на входе и выходе из многоконтурного теплообменника, °С;

t'_2, t''_2 – температуры воды, нагреваемой в змеевике для отопительного контура, на входе и выходе из ТО соответственно, °С;

t'_3, t''_3 – температура воды, поступающей из водопровода в ТО и нагреваемой во втором контуре змеевика для системы горячего водоснабжения, °С;

$\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ – изменение температуры теплоносителей, °С.

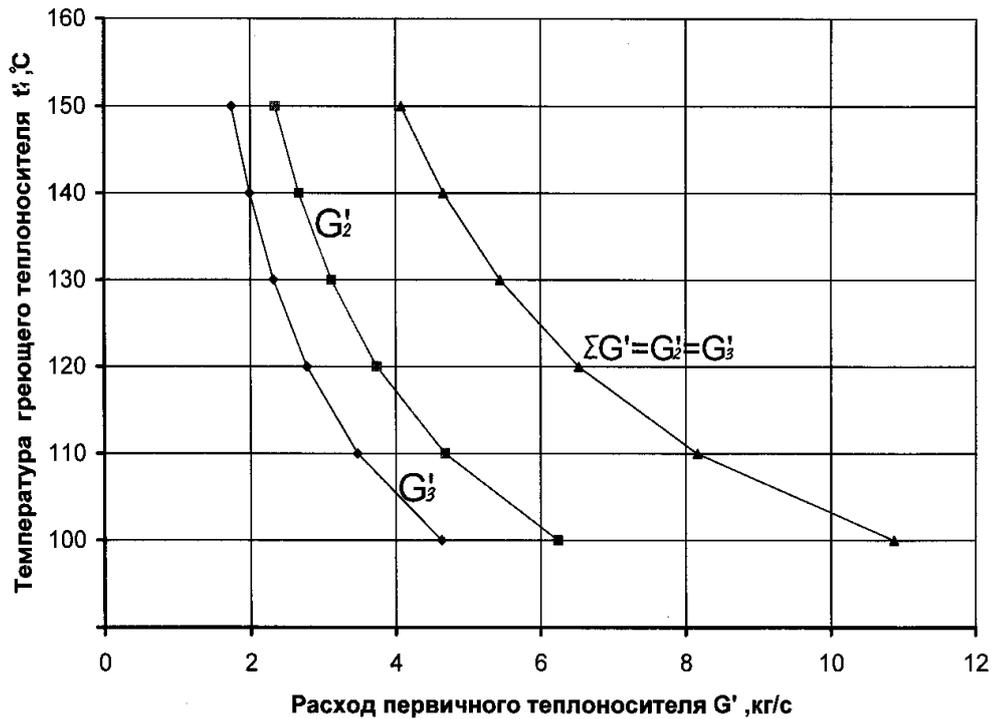


Рисунок 2 – Зависимость расхода теплоносителя от его температуры при расчетном расходе теплоты на отопление и горячее водоснабжение

Следует отметить, что величина термического КПД (η_t) не позволяет определить полноту использования подводимой теплоты греющего теплоносителя к многоконтурному теплообменнику, так как не учитывает ее энергетическую полезность. Только эксергетический метод позволяет дать как полноту использования переноса теплоты между теплоносителями, так и полноту использования ее термической, энергетической, механической и гидродинамической полезности.

В таблице 1 приведены основные параметры, необходимые для определения как термического КПД (η_t), так и эксергетического КПД (η_e), позволяющие проанализировать работу многоконтурного теплообменника змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения.

Аналогично уравнению теплового баланса для многоконтурного теплообменника можно записать уравнение эксергетического баланса:

$$\sum G \cdot E_{t_1} - E_{t_1}'' = G_2'' E_{t_2} - E_{t_2}'' + G_3'' E_{t_3} - E_{t_3}'' + \sum D, \quad (9)$$

где $E_{t_1}, E_{t_1}'', E_{t_2}, E_{t_2}'', E_{t_3}, E_{t_3}''$ – эксергии первичного и нагреваемых теплоносителей для соответствующих контуров систем отопления и горячего водоснабжения.

Эксергии теплоносителей, приведенные в таблице 1, вычисляются по уравнению:

$$e = h_i - T_{oc} \cdot S_i, \text{кДж/кг}, \quad (10)$$

где h_i – энтальпия теплоносителя, кДж/кг;

T_{oc} – температура окружающей среды, К;

S_i – энтропия теплоносителя, кДж/(кг·К).

Полная потеря эксергии в многоконтурном ТО, согласно уравнению (9):

$$\sum D = \sum G \cdot \Delta E_{t_1} - G_2'' \cdot \Delta E_{t_2} + G_3'' \cdot \Delta E_{t_3}, \text{кДж/кг}, \quad (11)$$

где $\Delta E_{t_1}, \Delta E_{t_2}, \Delta E_{t_3}$ – изменение термической составляющей эксергии теплоносителей, кДж/кг.

При отсутствии потерь эксергии уравнение (11) для многоконтурного ТО преобразуется в уравнение эксергетического КПД в виде

$$\eta_e = \frac{G_2'' \cdot \Delta E_{t_2} + G_3'' \cdot \Delta E_{t_3}}{\sum G \cdot \Delta E_{t_1}}. \quad (12)$$

Это универсальная величина η_e , которая определяет совершенство технической системы; для идеальных систем эксергетический КПД $\eta_e = 1$, т. е. потери эксергии $\sum D = 0$.

В теплообменных аппаратах эксергетические потери D связаны с внутренней потерей эксергии за счет необратимости теплообмена по длине, за счет трения и внешней потери эксергии в окружающую среду.

Мощность, расходуемая на преодоление гидравлических сопротивлений всех контуров, определяется, соответственно, кВт:

$$N_1 = \frac{\sum G \cdot \Delta P_{t_1}}{\eta_H \cdot \rho_{t_1}}; \quad N_2 = \frac{G_0'' \cdot \Delta P_{t_2}}{\eta_H \cdot \rho_{t_2}}; \quad N_3 = \frac{G_{ГВ}'' \cdot \Delta P_{t_3}}{\eta_H \cdot \rho_{t_3}}; \quad (13)$$

где $\Delta P_{t_1}, \Delta P_{t_2}, \Delta P_{t_3}$ – падение давлений теплоносителей, кПа;

$\rho_{t_1}, \rho_{t_2}, \rho_{t_3}$ – плотности теплоносителей, кг/м³;

η_H – КПД насоса, обычно $\eta_H = 0,75$.

Работа многоконтурного ТО характеризуется эксергетическим КПД. С учетом мощностей, затрачиваемых на преодоление гидравлических сопротивлений, эксергетический КПД запишется в виде

$$\eta_e = \frac{\left(\Delta E_{t_2} - \frac{N_2}{G_2''} \right) + \left(\Delta E_{t_3} - \frac{N_3}{G_3''} \right)}{\Delta E_{t_1} - \frac{N_1}{\sum G}}. \quad (14)$$

Потери эксергии $\sum D$ включают в себя как потери теплоты через изоляцию Q_{uz} , так и потери эксергии от необратимого теплообмена, таким образом $\eta_e < \eta_{uz}$; $Q_{uz} = Q_{ТП}$, тогда:

$$\eta_{uz} = 1 - \frac{Q_{uz}}{\sum G (h_{t_1'} - h_{t_1''})}. \quad (15)$$

где $h_{t_1}, h_{t_1'}$ – энтальпии теплоносителя на входе и выходе ТО, кДж/кг.

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	Энтальпия, кДж/кг	I'_{t_1}	632,2	589,1	546,3	503,7	461,32	419,06
		I''_{t_2}	292,97	292,97	292,97	292,97	292,97	292,97
		I'_{t_2}	397,99	397,99	397,99	397,99	397,97	397,99
		I''_{t_2}	292,97	292,97	292,97	292,97	292,97	292,97
		I'_{t_3}	21,01	21,01	21,01	21,01	21,01	21,01
		I''_{t_1}	251,09	251,09	251,09	251,09	251,09	251,09
7	Энтропия, кДж/кг·К	S'_{t_1}	1,8416	1,7391	1,6344	1,5276	1,4185	1,3069
		S''_{t_2}	0,9548	0,9548	0,9548	0,9548	0,9548	0,9548
		S'_{t_2}	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
		S''_{t_2}	0,9548	0,9548	0,9548	0,9548	0,9548	0,9548
		S'_{t_3}	0,0762	0,0762	0,0762	0,0762	0,0762	0,0762
		S''_{t_3}	0,8310	0,8310	0,8310	0,8310	0,8310	0,8310
8	Эксергия, кДж/кг	E'_{t_1}	171,8	154,35	137,7	121,8	106,7	92,335
		E''_{t_2}	54,27	54,27	54,27	54,27	54,27	54,27
		E'_{t_2}	85,49	85,49	85,49	85,49	85,49	85,49
		E''_{t_2}	54,27	54,27	54,27	54,27	54,27	54,27
		E'_{t_3}	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96
		E''_{t_3}	43,34	43,34	43,34	43,34	43,34	43,34
9	Термический КПД	η_t	0,9755	0,9791	0,9827	0,9849	0,9863	0,9876
10	Эксергетический КПД	η_e	0,7058	0,7181	0,7457	0,7677	0,7911	0,8181

В конечном виде, эксергетический КПД для многоконтурного теплообменника змеевикового типа запишется в виде

$$\eta_e = \frac{\left(\Delta E_{t_2} - \frac{N_2}{G_2} \right) + \left(\Delta E_{t_3} - \frac{N_3}{G_3} \right)}{\Delta E_{t_1} - \sum G} \cdot \eta_{из} . \quad (16)$$

Обработка результатов, приведенных в таблице 1, позволила определить как величину термического КПД многоконтурного ТО, так и эксергетический КПД, учитывающий полную потерю эксергии $\sum D$, включая: D_i – внутреннюю потерю эксергии; D_e – внешнюю; D_T –

техническую потерю, связанную с гидравлическими сопротивлениями и D_c – собственные потери эксергии, связанные с неравновесным теплообменом, кДж/кг:

$$\sum D = D_i + D_e + D_T + D_c . \quad (17)$$

Значения эксергетического η_e и термического η_t КПД приведены в таблице 1.

Режимы работы многоконтурного ТО связаны с изменением расчетных параметров теплоносителя в пределах от 150°C до 100°C , что повлекло за собой увеличение суммарного его расхода $\sum G$. Расходы G_0, G_{TB} и температуры T_{10} и t_T нагреваемых теплоносителей для систем отопления и горячего водоснабжения при всех режимах работы ТО оставались постоянными. Также неизменными были расходы теплоты Q_2'', Q_3'' , обеспечивающие требуемый режим работы местных систем отопления и горячего водоснабжения при $t_2' = 95^\circ\text{C}$; $t_2'' = 70^\circ\text{C}$; $t_3' = 60^\circ\text{C}$; $t_3'' = 5^\circ\text{C}$.

Термический КПД η_t многоконтурного ТО с понижением расчетной температуры греющего теплоносителя повышался от $\eta_t = 0,9755$ до $0,9876$, при изменении температуры, соответственно, от 150 до 100°C .

Также повышался и эксергетический КПД η_e от $0,7058$ до $0,8181$, который характеризует всю полноту использования подводимой теплоты теплоносителем, ее энергетическую, термическую и механическую полезность.

Что касается потерь эксергии на преодоление гидравлических сопротивлений многоконтурного ТО, то они составляют всего лишь $0,2...0,3\%$ от величины суммарных эксергетических потерь. Это подтверждает тот факт, что при расчете и проектировании многоконтурных теплообменников гидравлическими потерями можно пренебречь, а необходимо обратить внимание на снижение потерь эксергии за счет энергетической и термической составляющих, т. е. на полноту использования потенциала теплоты греющего теплоносителя.

На рисунке 3 представлены зависимости термического и эксергетического КПД от изменения расчетной температуры первичного теплоносителя (t_1 , $^\circ\text{C}$) и его расхода ($\sum G$, кг/с) в многоконтурном ТО змеевикового типа.

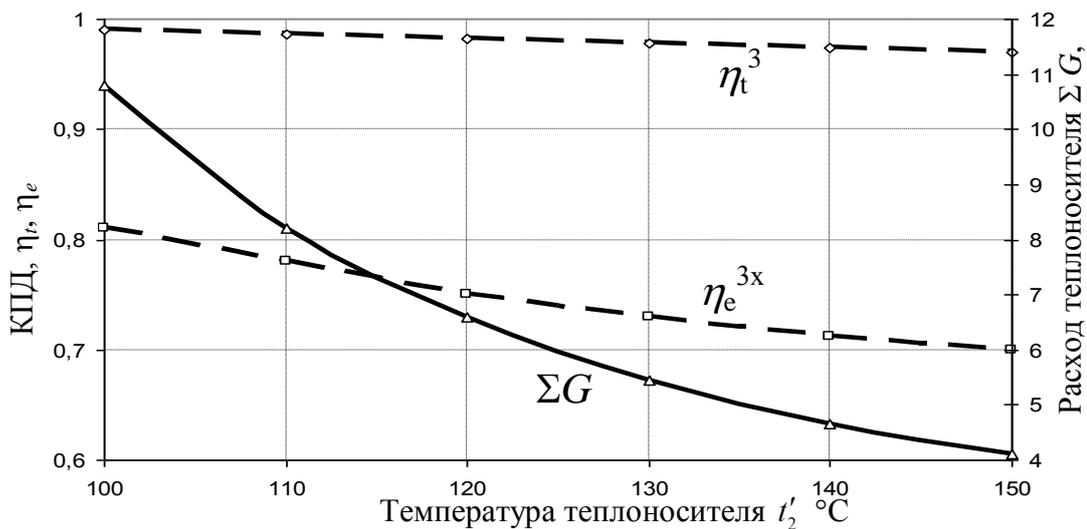


Рисунок 3 – Влияние расчетных параметров теплоносителя на эффективность теплообмена в многоконтурном теплообменнике змеевикового типа

Выводы

Таким образом, с повышением температуры греющего теплоносителя увеличивается потеря эксергии в окружающую среду, что влечет за собой снижение эксергетического КПД. В процентном выражении, при повышении температуры греющего теплоносителя от 100°C

до 150° С, эксергетический КПД уменьшается на 13,5 %, а термический КПД – всего лишь на 1,28 %. Это объясняется увеличением потерь эксергии за счет снижения расчетного расхода теплоносителя ΣG в 2,67 раза.

Список литературы

1. Олексюк А. А. Математическая модель расчета теплообменников змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения / А. А. Олексюк, И. Г. Штикова, А. А. Горделюк // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури «Інженерні системи та техногенна безпека». – Макіївка: Вид-во ДонНАБА, 2012. – Вип. 2 (94). – С. 70–75.
Oleksyuk A. A. Matematicheskaya model rascheta teploobmennikov zmeeyevikovogo tipa dlya nezavisimykh sistem otopleniya i goryachego vodosnabzheniya (Mathematical Design Model of Coiled Heat Exchanging Units for Independent Heating and Hot Water Supply Systems) / A. A. Oleksyuk, I. G. Shtikova, A. A. Gordelyuk // Visnyk Donbaskoi natsionalnoi akademii budivnytstva i arkhitektury “Inzhenerni systemy ta tekhnohenna bezpeka”. – Makiivka: Vyd-vo DonNABA, 2012. – Vyp. 2 (94). – S. 70–75.
2. Олексюк А. А. Конструктивный расчет теплообменника змеевикового типа для систем отопления и горячего водоснабжения / А. А. Олексюк, И. Г. Штикова, А. А. Горделюк // Журнал «Сучасне промислове та цивільне будівництво». – Макіївка: Вид-во ДонНАБА, 2012. – Т. 8. – № 1. – С. 37–44.
Oleksyuk A. A. Konstruktivnyi raschet teploobmennika zmeeyevikovogo tipa dlya system otopleniya i goryachego vodosnabzheniya (Design Calculation of Coiled Heat Exchanging Units for Heating and Hot Water Supply Systems) / A. A. Oleksyuk, I. G. Shtikova, A. A. Gordelyuk // Zhurnal “Suchasne promyslove ta tsivilne budivnytstvo”. – Makiivka: Vyd-vo DonNABA, 2012. – T. 8. – № 1. – S. 37–44.
3. Олексюк А. О. Створення енергоресурсозберігаючих систем геотермального теплопостачання з використанням сонячної енергії та теплових насосів / А. О. Олексюк, С. О. Челапко, А. А. Горделюк // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. – Горлівка: Вид-во АДІ, 2011. – № 1 (12). – С. 143–150.
Oleksiuk A. O. Stvorennia enerhoresursozberihaiuchykh system heotermalnogo teplopostachannia z vykorystanniam soniachnoi enerhii ta teplovykh nasosiv (The Geothermal Heating Supply Energy Saving System Engineering Using Solar Power and Heat Pumps) / A. O. Oleksiuk, S. O. Chelapko, A. A. Gordeliuk // Visti avtomobilno-dorozhnogo instytutu. – Gorlivka: Vyd-vo ADI, 2011. – № 1 (12). – S. 143–150.
4. Олексюк А. О. Оптимізація енергоресурсозберігаючих установок для геотермального теплопостачання житлових і громадських будинків / А. О. Олексюк, С. О. Челапко // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. – Горлівка: Вид-во АДІ, 2010. – № 2 (11). – С. 140–144.
Oleksiuk A. O. Optyimizatsiia enerhoresursozberihaiuchykh ustanovok dlia heotermalnogo teplopostachannia zhytlovykh i hromadskykh budynkiv (Energy Saving Units Optimization for Geothermal Heating Supply of Residential and Public Buildings) / A. O. Oleksiuk, S. O. Chelapko // Visti avtomobilno-dorozhnogo instytutu. – Gorlivka: Vyd-vo ADI, 2010. – № 2 (11). – S. 140–144.
5. Олексюк А. О. Методика розрахунку триконтурних ТО для незалежних систем опалення та гарячого водопостачання / А. О. Олексюк, С. О. Челапко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук. техн. зб. – К.: Вид-во КНУБА, 2009. – Вип. 13. – С. 13–18.
Oleksiuk A. O. Metodyka rozrakhunku trykonturnykh TO dlia nezaleznykh system opalennia ta hariachogo vodopostachannia (Design Procedure of Three-Circuit Heat Exchanging Units for Independent Heating and Hot Water Supply Systems) / A. O. Oleksiuk, S. O. Chelapko // Ventyliatsiia osvittlennia ta teplogazopostachannia: nauk. tekhn. zb. – K.: Vyd-vo KNUBA, 2009. – Vyp. 13. – S. 13–18.
6. Олексюк А. А. Математическая модель процессов тепломассообмена в трехконтурных ТО с аккумулятором теплоты / А. А. Олексюк, Н. В. Долгов // Вісник ДонНАБА «Інженерні системи та техногенна безпека». – Макіївка: Вид-во ДонНАБА, 2010. – Вип. 6 (86). – С. 123–130.
Oleksyuk A. A. Matematicheskaya model protsessov teplomassoobmena v trekhkonturnykh TO s akkumulyatorom teploty (Mathematical Model of Heat-And-Mass Transfer Process in Three-Circuit Heat Exchanging Units with Heat Accumulator) / A. A. Oleksyuk, N. V. Dolgov // Visnyk DonNABA “Inzhenerni systemy ta tekhnogenna bezpeka”. – Makiivka: Vyd-vo DonNABA, 2010. – Vyp. 6 (86). – S. 123–130.
7. Установки з незалежним приєднанням систем опалення та гарячого водопостачання за допомогою триконтурних ТО та вибір їх оптимальних параметрів / А. О. Олексюк, М. В. Долгов, Н. А. Максимова, А. А. Горделюк // Журнал «Сучасне промислове та цивільне будівництво». – Макіївка: Вид-во ДонНАБА, 2011. – Т. 7. – № 1. – С. 43–50.
Ustanovky z nezaleznym pryednanniam system opalennia ta hariachogo vodopostachannia za dopomohoiu trykonturnykh TO ta vybir yikh optymalnykh parametriv (Units with Independent Joining of Heating and Hot Water Supply Systems with the Help of Three-Circuit Heat Exchanging Units and Their Parameters Selection) / A. O. Oleksiuk, M. V. Dolgov, N. A. Maksimova, A. A. Gordeliuk // Zhurnal “Suchasne promyslove ta tsivilne budivnytstvo”. – Makiivka: Vyd-vo DonNABA, 2011. – T. 7. – № 1. – S. 43–50.
8. Олексюк А. А. Саморегулирующие энергоресурсосберегающие системы теплоснабжения от индивидуальных тепловых пунктов с подогревательно-аккумуляторными установками для независимых систем отопления и

горячего водоснабжения ЖКХ городов Украины / А. А. Олексюк, Н. В. Долгов // Вісник ДонНАБА «Інженерні системи та техногенна безпека». – Мakiivka: Вид-во ДонНАБА, 2010. – Вип. 2011. – 5 (91). – С. 87–92.

Oleksyuk A. A. Samoreguliruyushchiye energoresursoberegayushchiye systemy teplosnabzheniya ot individualno-teplovyykh punktov s podogrevatelno-akkumulyatornymi ustanovkami dlia nezavisimykh sistem otopleniya i goryachego vodosnabzheniya ZHKKH gorodov Ukrainy (Self-Regulating Energy Resource Saving Systems of Heating Supply from Individual Heating Units with Reheating Accumulator Units for Independent Heating and Hot Water Supply Systems of Housing and Communal Services of the Cities of Ukraine) / A. A. Oleksyuk, N. V. Dolgov // Visnyk DonNABA “Inzhenerni systemy ta tekhnogenna bezpeka”. – Makiivka: Vyd-vo DonNABA, 2010. – Vyp. 2011. – 5 (91). – S. 87–92.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. П. Висоцький, АДІ ДонНТУ
Стаття надійшла до редакції: 11.03.2013