

УДК 66.045.1

doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.08

А. Н. ГАНЖА, Е. Н. ЗАЕЦ, В. Н. ПОДКОПАЙ, Н. А. МАРЧЕНКО

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ-УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛОТЫ  
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И АГРЕГАТОВ

**АННОТАЦИЯ** Созданы уточнённые математические модели, методики и алгоритмы для расчета и анализа сложных теплообменных аппаратов систем утилизации теплоты энерготехнологических процессов. Они дают возможность определить фактическую работоспособность рекуператоров на различных режимах с учетом факторов эксплуатации. Уточненные методы и средства позволяют повысить эффективность и ресурс рекуператоров, проводить анализ их влияния на работу и технико-экономические показатели системы, уменьшить расходы топливно-энергетических и материальных ресурсов и негативное влияние высокотемпературных энерготехнологических процессов на окружающую среду.

**Ключевые слова:** теплообменные аппараты, утилизация теплоты, энерготехнологические процессы, топливно-энергетические ресурсы, факторы эксплуатации.

A. GANZHA, O. ZAIETS, V. PIDKOPAI, N. MARCHENKO

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF HEAT-EXCHANGERS-HEAT RECOVERY  
UNITS FOR ENERGY TECHNOLOGY SYSTEMS AND UNITS

**ABSTRACT** Consideration was given to the influence produced by the distribution of the local intensities of heat exchange on the efficiency of heat exchangers with cross and mixed currents. Mathematical models, methods and algorithms were developed to calculate and analyze complicated heat exchangers designed for the heat recovery. Proposed methods give us an opportunity to define the actual functionality of the recuperators in different modes taking into consideration operation factors. Improved computing methods and tools allow us to extend the life of recuperators, analyze the influences produced on the functionality and engineering-and-economical performances of the system, reduce the consumption of fuel-energy resources and material resources and reduce the negative influence of high-temperature energotechnological processes on the environment. Developed models can be used in the future to solve optimization problems related to the design and improvement of the recuperators-recovery units.

**Key words:** heat-exchangers, recuperator, local intensities of heat exchange, heat recovery systems, high-temperature energy technology processes, operation factors, engineering-and-economical performances, fuel-energy resources.

## Введение

В настоящее время в качестве утилизаторов теплоты энерготехнологических комплексов и агрегатов широко применяются теплообменники различного типа. Аппараты выполняют функции регенерации и рекуперации теплоты отходящих газов доменного производства, подогрева и промежуточного охлаждения воздуха в компрессорах газотурбинных установок и компрессорных станций. Из используемых аппаратов наибольшую долю составляют поверхностные теплообменники с перекрестным током теплоносителей. Такие теплообменники имеют большие габариты, которые соизмеримы с установками, где они используются, а зачастую и – превосходят их. Некоторое теплообменное оборудование ввиду длительного срока эксплуатации полностью либо частично отключается или заглушается, что приводит к существенному перерасходу топливно-энергетических и материальных ресурсов. Поэтому задача комплексного анализа и повышения эффективности вновь разрабатываемых, серийно выпускаемых и действующих теплообменников является актуальной для всей теплоэнергетической и промышленной сферы.

## Цель работы

Одним из путей повышения эффективности является интенсификация теплообмена, которую для рассматриваемых теплообменников целесообразно проводить со стороны теплоносителя с меньшим коэффициентом теплоотдачи. Для этого улучшают форму самой поверхности, разрабатывают более совершенное оребрение наружной поверхности труб [1–3 и др.]. Очевидно, что эффективность сложных аппаратов с перекрестным и смешанным током будет зависеть не только от заранее заданной общей интенсивности теплообмена, но и от распределения локальных интенсивностей (в каждой точке поверхности). Это распределение зависит от схемы включения секций, их количества, числа рядов труб в одной секции и их компоновки по ходам, температур теплоносителей и стенок, степени перемешивания и турбулизации каждого теплоносителя по ходу в каждой секции. Поэтому учет распределения локальных тепловых и гидравлических параметров с учетом условий эксплуатации (режимы, загрязнения, износ и пр.) дает возможность более точно определять интенсивность теплообмена в каждой точке и во всем аппарате. С помощью разработанных математической модели, методики и алгоритмов, которые учитывают вышеперечисленные факторы, можно

© А. Н. Ганжа, Е. Н. Заец, В. Н. Подкопай, Н. А. Марченко, 2016

проводить анализ эффективности, надежности и ресурса как вновь проектируемых, так и действующих аппаратов и разработать рекомендации к их повышению.

### Изложение основного материала

Теплообменники могут иметь различную компоновку: соединение секций по трубам (рядам труб) и соединение по струям наружного теплоносителя. В пределах одной секции наружный теплоноситель практически полностью не перемешивается. Степень неперемешивания наружного теплоносителя определяется количеством ребер (струй), приходящихся на единицу длины ряда труб. В пределах одной секции внутренний теплоноситель перемешивается частично – только в пределах одного ряда труб. Между секциями один из теплоносителей, как правило, перемешивается. Для расчёта температурного напора в подобных аппаратах традиционно пользуются зависимостями поправочного коэффициента к среднелогарифмическому температурному напору при противотоке  $\epsilon_p$ , в виде графиков или номограмм [2, 4 и др.], применять которые в расчетах на ЭВМ неудобно. Некоторые аналитические зависимости для анализа подобных аппаратов приводятся в [2, 4 и др.], однако они справедливы только для некоторых частных случаев компоновки поверхности. Основной недостаток подобных зависимостей – они интегральные (для аппарата в целом). Вследствие этого фактора интенсивность теплообмена в них входит осредненная и не учитывается ее локальное распределение и некоторые особенности компоновки поверхности. Все это приводит к значительным погрешностям в определении среднего температурного напора и необходимой площади поверхности (до 60–90 %). Это характерно также в случаях, если при расчетах теплообменника или их группы пользуются не методом поправочного коэффициента, а эмпирическими интегральными зависимостями эффективности нагрева или охлаждения в аппарате [5 и др.] (в основном в поверочных расчетах).

Проблемам повышения энергоэффективности доменного производства уделяют внимание многие авторы [6, 7 и др.]. В качестве утилизатора-рекуператора теплоты комплексов доменного производства чаще всего используются трубчатые поверхностные теплообменники-рекуператоры, состоящие из двухходовых секций (см. рис. 1а) [6].

В аппаратах, рассматриваемых в своем течении поперек трубного пучка, внешний теплоноситель (газы) практически полностью не перемешивается. Внутренний теплоноситель (воздух) перемешивается только при переходе с одного хода к другому и между последовательными секциями.

На рис. 1б представлена обобщенная схема

одной секции двухходового теплообменника-утилизатора со смешанной схемой течения теплоносителей и противоточным включением ходов. При последовательном добавлении секций или одного хода из этой схемы можно скомпоновать любое количество ходов по нагреваемому воздуху. Число рядов труб, которые последовательно омывает внешний теплоноситель в каждом ходе, может быть также произвольным.

Для упрощения процедуры определения эффективности теплообменников со сложной смешанной схемой тока и неравномерным (дискретным) распределением параметров теплоотдачи и теплопередачи предложена методика и алгоритм дискретного расчёта [8], где элементами, из которых скомпонован теплообменник (см. рис. 1), есть простые схемы однократного перекрестного тока с полным перемешиванием обоих теплоносителей по ходу. Следует отметить, что большинство традиционных подходов к дискретному расчёту теплообменников предусматривает разбивку поверхности на большое число элементов (конечных разностей), где, как правило, не учитываются особенности движения сред в элементах. Целесообразность разбивки теплообменника с целью уменьшения количества расчётных точек не на конечные разности, а на микротеплообменники, показана в работах [4, 9].

В предлагаемой методике эффективность каждого перекрестноточного элемента из рис. 1 (т.е. микротеплообменника) и температуры теплоносителей на выходе из элементов рассчитываются с учетом известной зависимости эффективности [2, 4] для классической схемы перекрестного течения с полным перемешиванием теплоносителей

$$P_3 = \frac{1}{\frac{1}{1 - e^{-NTU_{2,3}}} + \frac{R_3}{1 - e^{-R_3 \cdot NTU_{2,3}}} - \frac{1}{NTU_{2,3}}}; \quad (1)$$

$$t_{H_{2,3}} = t_{H_{1,3}} + P_3(t_{Г_{1,3}} - t_{H_{1,3}}) \quad (2)$$

и

$$t_{Г_{2,3}} = t_{Г_{1,3}} - P_3 R_3(t_{Г_{1,3}} - t_{H_{1,3}}), \quad (3)$$

где "э" – индекс, обозначающий, что параметры определяются в элементе; "1" – вход среды, "2" – выход среды; "н" и "г" – нагреваемый и греющий теплоносители;  $R$  и  $NTU_2$  – отношение расходных теплоемкостей и число единиц переноса теплоты к нагреваемому теплоносителю [3, 4],

$$R = \frac{W_H}{W_G}, \quad NTU_2 = \frac{K \cdot F}{W_H};$$

$K$  и  $F$  – коэффициент и площадь теплопередачи;  $W$  – расходная теплоёмкость (эквивалент расхода, водяной эквивалент) теплоносителя.

Зависимости для определения локальных температур теплоносителей (средних в элементе)

$$\overline{t_{H_3}} = t_{H_{1,3}} + J_{H_3}(t_{Г_{1,3}} - t_{H_{1,3}}) \quad (4)$$

и

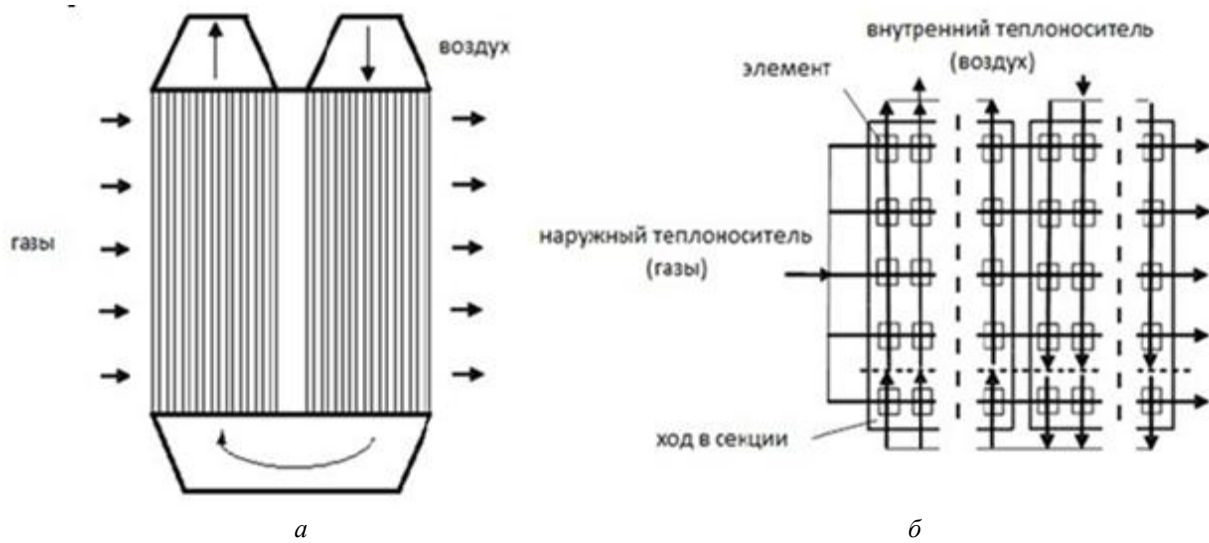


Рис. 1 – Схема одной секции теплоутилизатора а – конструкция; б – расчётная схема

$$\bar{t}_{г3} = t_{г13} - J_{г3}(t_{г13} - t_{н13}); \quad (5)$$

$$J_{н3} = P_3 \times \frac{1}{\sum_{\xi} 1 - e^{-NTU_{23}}} - \frac{1}{NTU_{23}} \frac{\ddot{Q}}{\varnothing} \quad (6)$$

и

$$J_{г3} = P_3 \times \frac{R_3}{\sum_{\xi} 1 - e^{-R_3 \times NTU_{23}}} - \frac{1}{NTU_{23}} \frac{\ddot{Q}}{\varnothing}. \quad (7)$$

По этим температурам определяются средние температуры теплоносителей во всем аппарате, чем решается известная проблема с их нахождением, а также – их средней разности.

Для противоточной схемы провести последовательный расчет теплообменника по элементам не представляется возможным. Уточнение происходит одновременно для всех элементов и дополнительно – температур и давлений теплоносителей на входе в каждый элемент и на выходе из всего аппарата, используется интервально-итерационный метод.

На основе предложенной методики была разработана расчетная программа. В целях расчета табличные данные свойств составляющих уходящих газов из [10] были аппроксимированы в виде формул. Теплофизические свойства смеси газов (теплопроводность, динамическая вязкость) определялись по методике из [6]. Программа учитывает наличие загрязнений и отложений на поверхностях и эксплуатационную шероховатость.

С помощью разработанной программы были проведены расчеты традиционного двухходового утилизатора с 16 последовательными рядами труб из стали 20 диаметром 57 мм в каждом ходе. При расчетах использовались экспериментальные данные по замерам температуры газов после регенераторов в период одного цикла дутья (0...6600 с), которая менялась от 104 до 400 °С. При значениях температуры, соответствующих отдельному временному шагу  $t$  рассчитывалась температура уходящих

газов из теплообменника, нагретого воздуха и рекуперированная тепловая мощность  $Q(t)$ . Для более точного определения рекуперированной теплоты за весь период дутья с помощью метода наименьших квадратов аппроксимирована зависимость тепловой мощности от времени. Общая рекуперированная теплота определялась как интеграл от аппроксимированной тепловой мощности по всему времени дутья  $t_d$ .

$$Q_p = \int_0^{t_d} \dot{Q}(t) dt. \quad (8)$$

Результаты расчёта приведены на рис. 2.

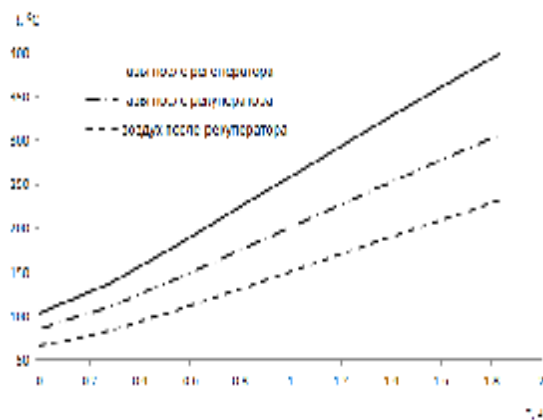


Рис. 2 – Результаты расчёта теплоутилизатора

Данный расчёт относится к режиму работы рекуператора, когда каждая секция включена параллельно и относится отдельно к своему регенератору. В большинстве случаев утилизатор включен в общий газопровод после всех регенераторов, которые работают попеременно. В этом случае рекуператор работает относительно в стационарном режиме.

## Обсуждение результатов

В результате расчёта рекуператора, соответствующему режиму работы на рис. 2 получено, что воздух подогревается за цикл в среднем с 26 до 144 °С за цикл, рекуперированная (утилизированная) теплота составила 15083 МДж. В режиме, когда рекуператор включён в общий газоход для всех регенераторов средняя температура отходящих газов после регенераторов – 246,2 °С, подогреваемого воздуха – 143 °С, рекуперированная (утилизированная) теплота за цикл – 14944 МДж. При сравнении результатов видно, что они практически совпадают. В первом случае утилизатор работает в нестационарном режиме, что будет вносить определенные погрешности. Однако на уменьшение этих погрешностей влияет длительность цикла и периодичность работы рекуператора (квазистационарный режим).

Экономия смеси доменного и коксового газа составила 3655 м<sup>3</sup>/цикл.

Такой же анализ можно провести и для подобного рекуператора-утилизатора, установленного в системе [6], который подогревает газы (топливо), идущие в регенераторы на сжигание.

## Выводы

Созданные уточненные математические модели, методики и алгоритмы для расчета и анализа сложных теплообменных аппаратов систем утилизации теплоты дают возможность определить фактическую работоспособность аппаратов на различных режимах с учетом факторов эксплуатации. Предложенные методы позволяют повысить их эффективность и ресурс, проводить анализ их влияния на работу установок и систем, и на их технико-экономические показатели, уменьшить негативное влияние высокотемпературных энерготехнологических процессов на окружающую среду.

## Список литературы

- 1 **Пиир, А. Э.** Итоги экспериментальных и теоретических исследований пучков из биметаллических ребристых труб [Текст] / **А. Э. Пиир, В. Б. Кунтыш** // Тепломассообмен. – ММФ-2004: V Мин. междунар. форум, 24–28 мая 2004 г. : тезисы докл. – Минск, 2004. – Т. 2. – С. 317–318.
- 2 **Кейс, В. М.** Компактные теплообменники [Текст] / **В. М. Кейс, А. Л. Лондон** ; пер. с англ. В.Я. Сидорова ; под ред. Ю.В. Петровского. – М. : Энергия, 1967. – 223 с.
- 3 **Galushcak, I. V.** Numerical Investigation of Heat Transfer to a Tube with Pushed Spiral-Tape Finning under a Transverse Flow of Gases [Text] / **I. V. Galushcak, V. Ya. Gorbatenko, A. A. Shevelev** // Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 59, N 1. – P. 70–74. – ISSN 0040-6015.
- 4 Справочник по теплообменникам [Текст] : в 2 т. / [пер. с англ. и под ред. Б. С. Петухова,

- В. К. Шикова]. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т. 1. – 560 с.
- 5 **Каневец, Г. Е.** Введение в автоматизированное проектирование теплообменного оборудования [Текст] / **Г. Е. Каневец, И. Д. Зайцев, И. И. Головач**. – Киев : Наук. думка, 1985. – 232 с.
- 6 **Грес, Л. П.** Энергосбережение при нагреве доменного дутья [Текст] : моногр. / **Л. П. Грес**. – Днепропетровск : Пороги, 2004. – 209 с.
- 7 **Улахович, В. А.** Выплавка чугуна в мощных металлургических печах. [Текст] / **В. А. Улахович**. – М. : Metallurgiya, 1991. – 172 с.
- 8 **Ганжа, А. М.** Комп'ютерне моделювання процесів у складних теплообмінних апаратах [Текст] / **А. М. Ганжа, Н. А. Марченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 9. – С. 113–120. – ISSN 2079-0023.
- 9 **Gaddis, E. S.** Exchange Temperature Distribution and Heat in Multi-Pass Shell-and-Tube Exchangers with Baffles [Text] / **E. S. Gaddis, E. U. Schlünder** // Heat Transfer Eng. – 1979. – Vol. 1, No. 1. – P. 43–52.
- 10 **Казанцев, Е. И.** Промышленные печи: справочное пособие для расчётов и проектирования [Текст] / **Е. И. Казанцев**. – М. : Metallurgiya, 1975. – 368 с.

## Bibliography (transliterated)

- 1 **Piir, A. Je.** (2004), “The results of experimental and theoretical investigations of the beams bimetallic finned tubes”, *Teplomassoobmen – MMF-2004* [Heat and Mass Transfer - IDF 2004], V Min. mezhduнар. Forum [V Min. Intern. forum], Minsk, Belarus, 24-28 May 2004, vol. 2, pp. 317–318.
- 2 **Kejs, V. M. and London, A. L.** (1967), *Kompaktnye teploobmenniki* [Compact Heat exchangers], Translated by Sidorova, V.Ja., in Petrovskogo, Yu.V. (ed.), Jenergija, Moscow, Russia.
- 3 **Galushcak, I. V., Gorbatenko, V. Ya. and Shevelev, A. A.** (2012), “Numerical Investigation of Heat Transfer to a Tube with Pushed Spiral-Tape Finning under a Transverse Flow of Gases”, *Thermal Engineering*, vol. 59, no. 1, pp. 70–74.
- 4 *Spravochnik po teploobmennikam: v 2 t* [Handbook of heat exchangers: in 2 volumes], Translated by Petuhova, B. S., in **Shikova, V. K.** (ed.), Jenergoatomizdat, Moscow, Russia.
- 5 **Kanevec, G. E., Zajcev, I. D. and Golovach, I. I.** (1985), *Vvedenie v avtomatizirovannoe proektirovanie teploobmennogo oborudovaniya* [Introduction to computer-aided design of heat exchange equipment], Nauk. dumka, Kiev, Ukraine.
- 6 **Gres, L. P.** (2004), *Jenergosberezhenie pri nagreve domennogo dut'ja* [Energy savings in heating blast air], Porogi, Dnepropetrovsk, Ukraine.
- 7 **Ulahovich, V.A.** (1991), *Vyplavka chuguna v moshhnykh metallurgicheskikh pechah* [Smelting iron in high-power metallurgical furnaces], Metallurgija, Moscow, Russia.
- 8 **Hanzha, A. M. and Marchenko, N. A.** (2010), “Computer modeling of processes in complex heat exchangers”, *Vestnyk Natsional'noho tekhnicheskoho unyversyteta "Khar'kovskyy polytekhnicheskyy unystytut"* : sb. nauch. trudov : tematycheskyy vyprusk "Systemnyy analiz, upravlenye y unformatsyonnye tekhnolohyy", no. 9, pp. 113–120.

- 9 **Gaddis, E. S. and Schlünder, E. U.** (1979), "Exchange Temperature Distribution and Heat in Multi-Pass Shell-and-Tube Exchangers with Baffles", *Heat Transfer Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 43–52.
- 10 **Kazancev, E. I.** (1975), *Promyshlennye pechi: spravochnoe posobie dlja raschetov i proektirovanija* [Industrial furnaces: a handbook for calculations and design], Metallurgija, Moscow, Russia.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Ганжа Антон Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры теплотехники и энергоэффективных технологий, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: [ganzha\\_371@ukr.net](mailto:ganzha_371@ukr.net), ORCID ID 0000-0003-3967-2421.

**Ganzha Anton** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Thermal Engineering and Energy Efficient Technologies, National of Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

**Заец Елена Николаевна** – аспирант кафедры теплотехники и энергоэффективных технологий, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, [Lena\\_vusyk@mail.ru](mailto:Lena_vusyk@mail.ru), ORCID ID 0000-0003-0562-9548.

**Zaiets Olena** – post-graduate student of the Department of Thermal Engineering and Energy Efficient Technologies, National of Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

**Подкопай Виктория Николаевна** – младший научный сотрудник кафедры теплотехники и энергоэффективных технологий, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, [vpodk@gmail.com](mailto:vpodk@gmail.com), ORCID ID 0000-0002-0212-1290

**Pidkopai Viktoriia** – Junior Researcher of the Department of Thermal Engineering and Energy Efficient Technologies, National of Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

**Марченко Наталья Андреевна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры системного анализа и управления, г. Харьков, Украина

**Marchenko Natalia** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent of the department of Systems analysis and management, National of Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Ганжа, А. Н.** Анализ эффективности теплообменников-утилизаторов теплоты энерготехнологических комплексов и агрегатов [Текст] / **А. Н. Ганжа, Е. Н. Заец, В. Н. Подкопай, Н. А. Марченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 56–60. – Бібліогр. : 10 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.08.

*Please cite this article as:*

**Ganzha, A., Zaiets, O., Pidkopai, V. and Marchenko, N.** (2016), "Analysis of the Efficiency of Heat-Exchangers – Heat Recovery Units for Energy Technology Systems and Units", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1182), pp. 56–60, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.08.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Ганжа, А. М.** Анализ эффективности теплообменников-утилизаторов теплоты энерготехнологических комплексов та агрегатів [Текст] / **А. М. Ганжа, О. М. Заец, В. М. Підкопай, Н. А. Марченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 56–60. – Бібліогр. : 10 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.08.

**АНОТАЦІЯ** Створено уточнені математичні моделі, методики та алгоритми для розрахунку і аналізу складних теплообмінних апаратів систем утилізації теплоты енерготехнологічних процесів. Вони дають можливість визначити фактичну працездатність рекуператорів на різних режимах з урахуванням факторів експлуатації. Уточнені методи і засоби дозволяють підвищити ефективність і ресурс рекуператорів, проводити аналіз їх впливу на роботу і техніко-економічні показники системи, зменшити витрати паливно-енергетичних і матеріальних ресурсів та негативний вплив високотемпературних енерготехнологічних процесів на навколишнє середовище.

**Ключові слова:** теплообмінні апарати, утилізація теплоты, енерготехнологічні процеси, паливно-енергетичні ресурси, фактори експлуатації.

*Поступила (received) 17.01.2016*