

**Розробка енергетичних і промислових систем охолодження з природною тягою на новій елементній основі.**

**Разработка энергетических и промышленных систем охлаждения с естественной тягой на новой элементной основе.**

**Development of energy and industrial cooling systems with natural draft which based on a new element base.**

**1. Номер державної реєстрації : № 0114U000561.**

**2. Науковий керівник:** ПИСЬМЕННИЙ Євген Миколайович, Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор.

**Научный руководитель:** ПИСЬМЕННИЙ Евгений Николаевич, Заслуженный деятель науки и техники Украины, доктор технических наук, профессор.

**Scientific advisor:** PIS'MENNYI Ye. N. Honored worker of science and technology of Ukraine, doctor of technical science, professor.

**3. Суть розробки, основні результати:**

**(укр.)**

Безперервне зростання дефіциту охолоджуючої води і посилення екологічних вимог через теплове забруднення довкілля тісно пов'язано з вирішенням проблеми раціонального використання водних ресурсів та скорочення водоемних технологій. Це обумовлює необхідність використання сучасних енерготехнологій та модернізації за їх допомогою існуючих систем охолодження у різноманітних виробництвах.

Потреби ринку України в нових ресурсозберігаючих системах повітряного охолодження можна ефективно вирішити шляхом застосування теплообмінних поверхонь з новою елементною базою у вигляді оребрених труб зручнообтічної форми. Таким вимогам відповідають запропоновані нові поверхні з пакетів плоскоовальних труб з неповним поперечним оребренням, що не мають вад, які притаманні відомим типам теплообмінних поверхонь з круглих сталевих та біметалічних оребрених труб, або сталевих овальних труб з насадженим чи механічно навитим оребренням. Нові труби поєднують в собі високий ступінь розвинення поверхні, ідеальний термічний контакт між ребрами і несною трубою, низький аеродинамічний опір та високу технологічність.

В рамках прикладної науково-дослідної роботи розроблені та виготовлені лабораторні макети-зразки плоскоовальних труб з неповним поперечним оребренням за допомогою відносно дешевої технології автоматизованого контактного приварювання прямокутних ребер до плоскоовальної труби.

Уперше досліджений теплообмін поверхні з труб зручнообтічної форми в умовах вимушеної, вільної конвекції та природної тяги в широкому діапазоні швидкостей омивання (0 – 20) м/с.

За результатами експериментальних та числових досліджень побудовані моделі обтікання оребреної поверхні в умовах вільної конвекції та природної тяги при малих швидкостях потоку. Визначена структура течії у ближньому сліді за оребреною трубою та на поверхнях плоскоовальної труби і ребрах у межах пограничних шарів, виявлені на робочих поверхнях області відриву потоку.

Отримані нові системи узагальнюючих співвідношень для розрахунку тепловіддачі та опору в умовах малих швидкостей обтікання труб, які враховують геометричні характеристики труб та крокові характеристик пакетів, вільної конвекції та природної тяги. Для області змінення параметра ребра від 0,2 до 0,65 запропонована нова, більш вдосконалена і точніша формула для розрахунку коефіцієнта ефективності прямокутного ребра плоскоовальної труби.

Для підтвердження ідей, закладених в конструкцію плоскоовальної труби з неповним поперечним оребренням, на підставі експериментальних даних з теплообміну пакетів з таких труб, для перевірки правильності підходу до узагальнення отриманих результатів і достовірності узагальнених емпіричних залежностей для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та коефіцієнта ефективності ребра спроектований та виготовлений макет модуля „сухого” повітряного охолоджувача. На виготовленому модулі проведені лабораторні теплотехнічні випробування. Випробування охолоджувача та результати експериментального дослідження теплоаеродинамічних характеристик пакетів плоскоовальних оребрених труб показали конкурентоспроможність таких труб при використанні їх в якості поверхонь теплообміну для систем „сухого” охолодження технологічних продуктів, як в умовах вимушеної конвекції при малих швидкостях омивання повітрям, так і в умовах вільної конвекції та природної тяги.

За результатами досліджень отримані нові методи розрахунків теплообміну і аеродинамічного опору поверхонь з оребрених плоскоовальних труб, які призначені для „сухих” систем охолодження технологічних продуктів. Створені методи, які базуються на емпіричних узагальнених залежностях призначені для теплообмінних апаратів „сухих” систем охолодження (типу „газ-рідина”), що працюють при вимушеній, вільній конвекції та природної тяги.

Результати випробувань та теплоаеродинамічних розрахунків показали, що в разі використання оребрених плоскоовальних труб можна підвищити компактність, зменшити габарити і масу, порівняно з існуючими традиційними типами ребристих труб, які використовуються в системах „сухого” охолодження різних рідинних продуктів на (25-30) % за рахунок високих теплопередавальних властивостей пропонованих труб.

(рос.)

Непрерывный рост дефицита охлаждающей воды и усиление экологических требований из за теплового загрязнения окружающей среды тесно связано с решением проблемы рационального использования водных ресурсов и сокращения водоемких технологий. Это обуславливает необходимость использования современной энерготехнологии и модернизации с их помощью существующих систем охлаждения в различных производствах.

Потребности рынка Украины в новых ресурсосберегающих системах воздушного охлаждения можно эффективно решить путем применения теплообменных поверхностей с новой элементной базой в виде оребрених труб удобообтекаемой формы. Таким требованиям отвечают поверхности из плоскоовальных труб с неполным поперечным оребрением, которые не имеют недостатков, присущих известным типам теплообменных поверхностей из круглых стальных и биметаллических оребрених труб, или стальных овальных труб, с насаженным или механически навитым оребрением. Такие трубы совмещают в себе высокую степень развития поверхности, идеальный термический контакт между ребрами и трубой, низкое аэродинамическое сопротивление и высокую технологичность.

В рамках прикладной научно-исследовательской работы разработаны и изготовлены лабораторные макеты-образцы плоскоовальных труб с неполным поперечным оребрением с помощью относительно дешевой технологии автоматизированной контактной сварки прямоугольных ребер к плоскоовальной трубе.

Впервые исследован теплообмен поверхности из труб удобообтекаемой формы в условиях вынужденной, свободной конвекции и естественной тяги в широком диапазоне скоростей омывания (0 - 20) м/с.

По результатам экспериментальных и численных исследований построены модели обтекания оребренной поверхности в условиях свободной конвекции и естественной тяги при малых скоростях омывания. Определена структура течения в ближнем следе за оребренной трубой и на поверхностях несущей трубы и ребрах в пределах пограничных слоев, обнаруженные на рабочих поверхностях области отрыва потока.

Получены новые системы обобщающих соотношений для расчета теплоотдачи и сопротивления в условиях малых скоростей обтекания труб, учитывающие геометрические характеристики труб и шаговые характеристик пакетов, свободной конвекции и естественной тяги. Для области изменения параметра ребра от 0,2 до 0,65 предложена новая, более усовершенствованная и более точная формула для расчета коэффициента эффективности прямоугольного ребра плоскоооальной трубы.

Для подтверждения идей, заложенных в конструкцию плоскоооальной трубы с неполным поперечным оребрением, на основании экспериментальных данных по теплообмену пакетов из таких труб, для проверки правильности подхода к обобщению полученных результатов и достоверности обобщенных эмпирических зависимостей для расчета коэффициентов теплоотдачи и коэффициента эффективности ребра спроектирован и изготовлен макет модуля „сухого” воздушного охладителя. На изготовленном модуле проведены лабораторные теплотехнические испытания. Испытания охладителя и результаты экспериментального исследования теплоаэродинамических характеристик пакетов плоскоооальных оребренных труб показали конкурентоспособность таких труб при использовании их в качестве поверхностей теплообмена для систем „сухого” охлаждения технологических продуктов, как в условиях вынужденной конвекции при малых скоростях омывания воздухом, так и в условиях свободной конвекции и естественной тяги.

По результатам исследований созданы новые методы расчетов теплообмена и аэродинамического сопротивления поверхностей из оребренных плоскоооальных труб, предназначенных для „сухих” систем охлаждения технологических продуктов. Созданные методы базируются на эмпирических обобщенных зависимостях и предназначены для теплообменных аппаратов „сухих” систем охлаждения (типу „газ-жидкость”), которые работают при вынужденной, свободной конвекции и естественной тяги.

Результаты испытаний и теплоаэродинамических расчетов показали, что в случае использования оребренных плоскоооальных труб можно повысить компактность, уменьшить габариты и массу по сравнению с существующими традиционными типами ребристых труб, которые используются в системах „сухого” охлаждения различных технологических продуктов на (25-30) % за счет высоких теплопередающих свойств предлагаемых труб.

**(англ.)**

Continuous growth in cooling water shortages and increase of environmental requirements through thermal pollution is closely linked with the problem of rational use of water resources and reducing water-intensive technologies. This necessitates the usage of modern energy technologies and their upgrading with help of existing cooling systems in a variety of industries.

The needs of buyers market of Ukraine in the new resource-air cooling systems can be effectively solved by the application of heat transfer surfaces with a new element base in the form of finned tubes of comfortable form of flowing. Such requirements are met by the proposed new surfaces of the bundles of flat oval tubes with an incomplete transverse fins that have no defects inherent in the known types of heat transfer surfaces of round steel and bimetallic finned tubes or steel oval tubes with planted or mechanically wrapped finning. New tubes combine a high degree of surface expansion, ideal thermal contact between the fins and tube, low aerodynamic drag and high manufacturability.

As part of the applied research there are designed and manufactured laboratory models and samples of flat oval tubes with an incomplete transversal fins by using relatively cheap technologies of automated contact welding of fins to flat oval tube

For the first time ever it is examined heat exchange of surface from tubes of comfortable form of flowing in conditions of forced, free convection and natural draft in a wide range of circumfluence velocities (0 - 20) m/s.

As the result of experimental studies and numerical models there are constructed flow models of finned surface under free convection and natural draft under low circumfluence

velocities. The structure of the flow in the near trail for finned tube and tube bearing surfaces and edges within boundary layers identified on the working surfaces of the field of flow separation.

There are received new systems of general relations for the calculation of heat transfer and aerodynamic drag in the conditions of low-velocity of tubes flow, that take into account the geometric characteristics of tubes and stepper characteristics of packages, free convection and natural draft. To change a parameter of fins from 0.2 to 0.65 it is proposed a new, more advanced and more accurate formula for calculating the efficiency ratio of the rectangular fin of flat oval tube.

To confirm the ideas applied in the design of flat oval tubes with an incomplete transverse fins on the basis of experimental data on heat transfer of bundles of these tubes and to verify the approach to the synthesis of results and reliability of the generalized empirical relationships for calculation of heat transfer coefficients and the efficiency coefficient of fins it was designed and manufactured layout of module of „dry” air cooler. On this module there were conducted laboratory thermal tests. Tests of coolant and experimental results of heat and aerodynamic characteristics of bundles of flat oval tubes with fins showed the competitiveness of such tubes when being used as the surface in heat exchange systems for „dry” cooling processed products, both in terms of forced convection, at low air circumfluence velocities and under free convection and natural draft.

According to the research there are created new methods of calculation of heat transfer and aerodynamic drag of surfaces of the flat oval tubes with an incomplete transverse fins intended for the „dry” systems of cooling of technological products. Created methods are based on empirical distributions dependencies and are designed for heat exchangers of "dry" cooling systems (type "gas-liquid"), which operate in a forced, free convection and natural draft.

Results of testing and heat aerodynamic calculations have shown that in case of use of flat oval tubes with an incomplete transverse fins it is possible to increase compactness, to reduce size and weight in comparison with existing conventional types of finned tubes which are used in "dry" cooling systems of various technological products (25-30)% due to the high heat transfer properties of the proposed tubes.

#### **4. Наявність охоронних документів на об’єкти права інтелектуальної власності:**

1. Патент на корисну модель №93293. Теплоутилізатор-повітропідігрівач газотурбінної установки / Письменний Є.М., Туз В.О., Ніщик О.П., Кондратюк В.А., Терех О.М. 25.09.2014. Бюл. №8.

2. Письменний Є.М., Туз В. О., Руденко О.І., Ніщик О.П., Терех О.М., Теплообмінник № U 201505255 від 28.05.2015.

#### **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Розроблена теплообмінна поверхня з оребрених труб зручнообтічного профілю, порівняно з відомими аналогами у вигляді круглих сталевих та біметалічних оребрених труб, або сталевих овальних труб з насадженням чи механічно навитим повним оребренням, які широко застосовуються зараз у теплообмінних апаратах різних систем охолодження (США, Німеччина, Польща, Китай, Росія), має підвищенні техніко-економічні характеристики. Так, використання поверхонь з біметалічних труб, часто призводить до надмірного зростання загальної довжини труб, габаритів та вартості теплообмінних пристроїв внаслідок невисокого ступеня розвинення поверхні (не більше 15), наявності контактної термічної опору та високого аеродинамічного опору насамперед через щільний міжреберний зазор (менше 2 мм) та відсутність ділянок на трубі зі сприятливим омиванням. У сукупності це не уможливорює ефективне використання труб-аналогів в теплообмінниках систем «сухого» повітряного охолодження технологічних продуктів (АПО, градирні, тощо) особливо в економічних режимах роботи: вільної конвекції або природної тяги при швидкостях обдування повітрям менше 3 м/с.

Нова теплообмінна оребрена труба плоскоовального профілю порівняно зі світовими аналогами має високий ступінь розвинення поверхні, ідеальний термічний контакт між ребрами і несучою трубою, істотно нижчий аеродинамічний опір, високу технологічність і

здешевлення виробництва за рахунок автоматизованого контактного приварювання ребер до основної труби. Завдяки плоскоовальній формі, труба забезпечує кращі умови обтікання і теплообміну при природній тязі, де швидкості повітряного потоку не перевищують 3 м/с.

Плоскоовальні труби з неповним поперечним оребренням порівняно зі світовими аналогами дозволяють подовжити термін експлуатації теплообмінного пристрою в економічно привабливих режимах природної тяги на 1-2 місяці, що заощадить електроенергію на привід вентилятора до 25-30 %.

#### **6. Економічна привабливість розробки для просування на ринок, впровадження та реалізації, показники, вартість.**

Економічний ефект від впровадження нових теплообмінних поверхонь в системах „сухого” охолодження технологічного продукту з природною тягою при їх модернізації або реконструкції (градирні, АПО, тощо) полягає у заміні діючих, як правило, малоефективних теплообмінних ребристих поверхонь на запропоновані поверхні зручнообтічної форми.

На цей час середня вартість одного погонного метра біметалевих круглоребристих труб імпортованих виробників (США, Німеччина, Польща, Росія, Китай), які можуть розглядатися як альтернатива, розробленим в НТУУ „КПІ” оребреним трубам зручнообтічної форми, складає (160-180) грн. Очікувана вартість оребреної труби зручнообтічної форми може скласти не більше 220 грн, але цю вартість можна віднести до дослідних зразків, при серійному виробництві їх вартість знизиться на (20-25)%. Крім того, за рахунок покращення аеродинамічної якості запропонованої труби при зовнішньому омиванні повітряним потоком, аеродинамічний опір в цілому поверхні суттєво зменшиться, що у підсумку призведе до покращення теплоаеродинамічних характеристик системи „сухого” охолодження.

Вартість поверхні теплообмінника, яка виготовлена з оребрених труб плоскоовального профілю буде менше ніж вартість труб такого ж теплообмінного пристрою, який виготовлений з біметалічних ребристих труб приблизно на (10-15)%.

Якщо припустити, що теплова потужність обох типів порівнюваних інтенсифікованих трубчастих поверхонь біметалевих та зручнообтічних становить 1,2 МВт (відносно низька), то за вартістю погонного метра з мінімальною різницею у 3-5 грн. між ними при серійному виробництві оребрених труб зручнообтічної форми, очікуваний економічний ефект від їх застосування для певного типорозміру теплообмінного пристрою може скласти приблизно до 8-10 тисяч гривень, що може стати привабливим при просуванні розробки на ринку.

#### **7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, відомства, підприємства, організації).**

Користувачами результатів роботи можуть бути проектні організації і промислові підприємства, що розробляють нові та удосконалюють існуючі теплообмінні апарати, що працюють в умовах вільної конвекції та природної тяги („сухі” градирні, апарати повітряного охолодження та інші).

Імовірні замовники результатів роботи:

- галузі: теплоенергетика, хімічне машинобудування, нафтопереробка, системи транспортування природного газу по трубопроводах;
- підприємства: ПАТ «Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе» (м. Суми), Укрнафтогаз, ТОВ „СПКТЬБ” „ЕНЕРГОМАШПРОЕКТ” (м.Київ), ЗАО НПВП „Турбоконт” (м. Калуга, Росія), ПАТ „Факел” (м. Фастів), ВНПТТрансгаз, ДП НВКГ «Зоря - Машпроект» (м. Миколаїв);

#### **8. Стан готовності розробки.**

На сьогодні створена науково-технологічна база для розробки перспективних вискоефективних теплообмінників з пакетів оребрених труб плоскоовальної форми для систем повітряного охолодження («сухих» градирень, апаратів повітряного охолодження),

що працюють у режимах вільної та вимушеної конвекції, природної тяги при швидкостях омивання від 0 до 20 м/с.

Освоєно виробництво під заказ плоскоовальних ребристих труб довжиною до 3 метрів з оптимізованими розмірами поперечних ребер на ДП «ОКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ».

Стан готовності розробки у вигляді експериментального лабораторного макету модуля «сухої» градирні на базі оребреної теплообмінної поверхні зручнообтічної форми.

#### **9. Існуючі результати впровадження:**

Результати роботи використані в навчальному процесі кафедри АЕС і ІТФ. Результати роботи використані при виконанні г/д № 2.041 з НВО ім Фрунзе, м. Суми (обсяг 30 тис. грн).

**10. Назва підрозділу, телефон, e-mail:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут" (НТУУ "КПІ"), теплоенергетичний факультет (ТЕФ), кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики (АЕС і ІТФ), робочий тел. факс: (044) 406-80-87, (044) 454-97-87, [teram57@meta.ua](mailto:teram57@meta.ua)

#### **11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання:**

1. Pis'mennyi E.N. Universal relations for calculation of the drag of transversely finned tube bundless / E.N. Pis'mennyi, A. M. Terekh, Polupan G.P., I. Carvajal- Mariscal, F. Sanches-Silva // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. - V.73, - june 2014. - P. 293-302.

2. Pis'mennyi E. N. Heat transfer enhancement at tubular transversely finned heating surfaces / E.N. Pis'mennyi // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – V.70. – № 3. – P. 1050-1063.

3. Neilo R.V. Experimental investigation of dynamic and temperature field during natural convection around horizontal cylinder confined vertical walls / R.V. Neilo, V.O. Tuz// Innovations and Technologies News. – 2014. – № 1(18). – P. 26-33.

4. Неїло Р.В. Димова візуалізація при теплообміні вільною конвекцією на поверхні горизонтального циліндра / Р.В. Неїло // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – №1/1(15). – С.10-14.

5. Неїло Р.В. Дослідження гідродинаміки в умовах вільної конвекції в теплообмінних поверхнях підігрівачів газу / Р.В. Неїло, В.О. Туз // Нафтогазова галузь України. – 2014. – №7(7). – С.12-18.

6. Письменный Е.Н. CFD-моделирование процессов теплообмена труб удобообтекаемой формы с неполным поперечным оребрением / Е.Н. Письменный, В.А. Рогачов, А.В. Баранюк, А.В. Семеняко, М.М. Вознюк // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – №1 (20). – С. 30 – 36.

7. Письменный Е.Н. CFD-моделирование омывания поверхности труб удобообтекаемой формы с неполным поперечным оребрением / Е.Н. Письменный, В.А. Рогачов, А.В. Баранюк, А.В. Семеняко, М.М. Вознюк // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – №2 (21). – С. 76 – 80.

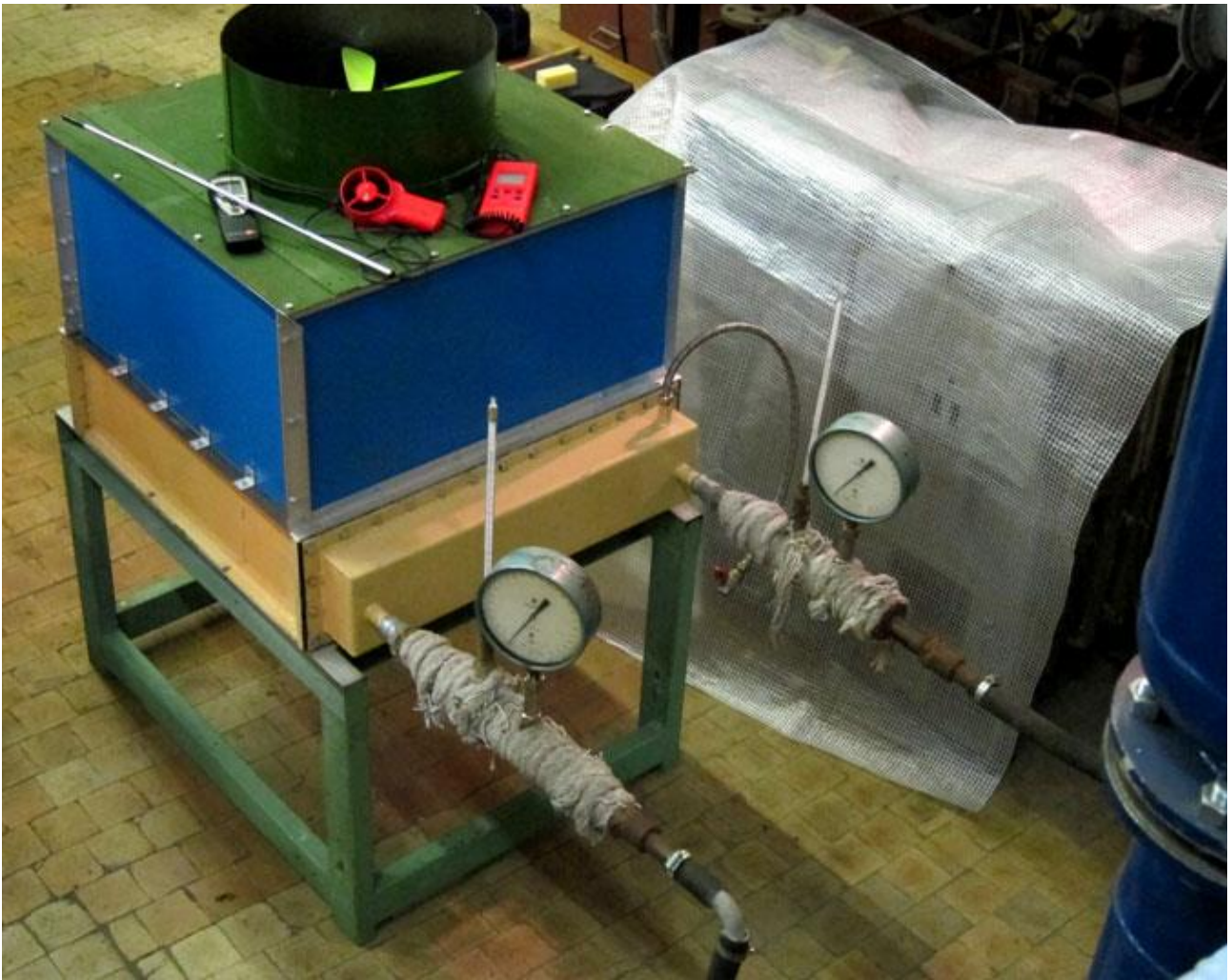
8. Рогачев В. А. Теплотехнические испытания аппарата воздушного охлаждения горизонтального типа/ В. А. Рогачев, А. В. Семеняко, Р. А. Лазоренко, Р. Н. Серeda, В. П. Парафейник// Энергетика економіка, технології, екологія. – 2014. – №4. – С. 71-78.

9. Кондратюк В. А. Теплообмін шахових пакетів плоскоовальних труб в поперечному потоці / В. А. Кондратюк, О. М. Терех, О. В. Баранюк, Є. М. Письменный // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 1/8(73). – С. 43-48.

10. Вознюк М. М. Теплообмін поперечно-омиваних шахових пучків плоскоовальних оребрених труб при малих числах Рейнольдса / М. М. Вознюк, О. М. Терех, В. А. Рогачов, О. В. Баранюк // Scientific Journal «ScienceRise». – 2015. – № 5/2(10). – С. 36-40.

11. Вознюк М. М. Аеродинамічний опір шахових пакетів плоскоовальних оребрених труб при малих числах Рейнольдса / М. М. Вознюк, І.С. Башкир, О. М. Терех, В. А. Рогачов, О. І. Руденко // Scientific Journal «ScienceRise». – 2015. – № 6/2(11). – С. 90-94.

12. Руденко А.И. Эффективность внедрения инновационного энергосберегающего оборудования на предприятиях ЖКХ Украины / А.И. Руденко, О.А. Мезенцева, А.М. Терех // Бизнес Информ. 2014. - №3. – С.222-224.
13. Письменный Е.Н. Опыт внедрения теплоутилизаторов из плоскоовальных оребренных труб / Е.Н. Письменный, М.М. Вознюк // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. Сборник трудов. Киев: ИПЦ АЛКОН, 2014. – С. 135-137.
14. Парафейник В.П. Анализ эффективности АВО как отдельного изделия и как элемента энерготехнологической системы для компримирования углеводородного газа/ В.П. Парафейник, Р.А. Лазоренко, С.А. Прилипко, В.А. Рогачев, А.В. Семеняко// Труды XVI международной научно-технической конференции по компрессоростроению. – 2014. – Т.1. – С. 385-398.
15. Письменный Е.Н. Опыт внедрения утилизаторов из плоскоовальных оребренных труб/ Е.Н. Письменный, П.И. Багрий, М.М. Вознюк // Труды 6 Российской национальной конференции по теплообмену. 27-31 октября 2014 г., г. Москва, Россия.
16. Неило Р.В. Теплообмен и гидродинамика одиночного горизонтального цилиндра в вертикальном щелевом адиабатном канале в условиях термогравитационной конвекции/ Р.В. Неило, В.Е. Туз// Труды 6 Российской национальной конференции по теплообмену. 27-31 октября 2014 г., г. Москва, Россия.
17. Письменный Е.Н. Теплообмен и сопротивление винтообразных труб в поперечном потоке / Е.Н. Письменный, С.А. Рева, А.В. Баранюк // Труды 6 Российской национальной конференции по теплообмену. 27-31 октября 2014 г., г. Москва, Россия.
18. Вознюк М. М. Теплообмін плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної конвекції і природної тяги / М. М. Вознюк, Є. М. Письменный // XIII Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів і студентів „Сучасні прблеми наукового забезпечення енергетики”, м. Київ, 21-24 квітня 2015 р. Тези доповідей. К.: НТУУ „КПІ”, 2015. – Т.1. – С. 61.
19. Башкір І. С. Промислові „сухі” системи охолодження на новій елементній базі / І. С. Башкір, О. Ю. Черноусенко, О. М. Терех // XIII Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів і студентів „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”, м. Київ, 21-24 квітня 2015 р. Тези доповідей. К.: НТУУ „КПІ”, 2015. – Т.1. – С. 94.



Зовнішній вигляд діючого лабораторного макету модуля „сухої” градирні