

**Тепломасообмін при конденсації водяної пари з продуктів згорання на поверхні профільованих оребрених труб.**

**Тепломасообмен при конденсации водяного пара из продуктов сгорания на поверхности профилированных оребренных труб.**

**Heat and mass transfer during condensation of water steam from the products of combustion on the surface of profiled finning tubes.**

**1. Номер державної реєстрації: № 0115U000336,**

**2. Науковий керівник: д.т.н., Туз Валерій Омелянович, професор, завідувач кафедри АЕС і ІТФ., Туз Валерий Емельянович, Tuz V. E.**

**3. Суть розробки, основні результати.**  
(укр.)

Повномасштабне освоєння в Україні величезного потенціалу енергозбереження за рахунок утилізації теплоти викидних газів промислових енергетичних і технологічних установок, що використовують вуглеводневі палива, неможливе без глибокого охолодження цих газів в конденсаційних теплоутилізаторах.

Сутність розробки полягає у застосуванні в конденсаційних теплоутилізаторах в якості теплообмінних поверхонь оребрені плоскоовальні труби, які характеризуються істотно меншим аеродинамічним опором та скороченою кормовою зоною накопичення плівки конденсату. Крім того, наявність системи ефективних прямокутних ребер, приварених до плоскоовальної труби, порівняно зі звичайними круглими ребрами, призводить до підвищення ефективності оребрення та збільшує площу поверхні контакту фаз при омиванні її парогазовою сумішшю в умовах глибокої утилізації.

Для ребристих плоскоовальних поверхонь, що працюють в умовах конденсації пари з парогазової суміші, відсутні розрахункові співвідношення, які можуть бути покладені в основу розробки сучасних методів теплоаеродинамічних розрахунків та оптимізації конструкції поверхневих конденсаційних утилізаторів на основі високорозвинених поверхонь з низьким аеродинамічним опором.

В межах виконаної науково-дослідної роботи виготовлені експериментальні макети зі сталевих плоскоовальних труб з неповним поперечним оребренням в діапазонах таких геометричних характеристик: поперечний та поздовжній розміри плоскоовальної труби, відповідно  $d_1 = 15$  мм та  $d_2 = (30-42)$  мм; розміри ребер: висота  $h = (20-25)$  мм, довжина  $l = (45-50)$  мм, товщина  $\delta = (0,8-1,0)$  мм, крок між ребрами  $t = (3,5-4,0)$  мм.

Дослідження тепломасообміну та аеродинамічного опору поверхонь з оребрених плоскоовальних труб в умовах конденсації водяної пари з продуктів згорання проведені при широкому варіюванні їх геометричних характеристик та швидкостей потоку. Визначено вплив на тепломасообмін та опір геометричних характеристик поверхонь та режимних факторів. Визначений кількісний зв'язок та вплив концентрації водяної пари на інтенсивність теплообміну, встановлений оптимальний діапазон теплових та аеродинамічних характеристик оребрених поверхонь, що працюють в умовах крапельно-плівкової конденсації водяної пари на поверхні, розкритий механізм інтенсифікації теплообміну та характеру гідродинаміки потоку парогазової суміші при взаємодії його з високорозвиненою оребреною поверхнею. На базі проведених комплексних досліджень запропоновані нові узагальнюючі залежності для розрахунку тепломасообміну та аеродинамічного опору оребрених поверхонь з плоскоовальних труб, що розширює клас задач, присвячених конденсації водяної пари з продуктів згорання на теплообмінній поверхні, а їх результати є основою для розвитку сучасних методів розрахунків поверхневих конденсаційних апаратів.

За результатами експериментальних досліджень вперше отримані інженерні методи теплового та аеродинамічного розрахунків поверхонь з оребрених плоскоовальних труб, які дозволяють розробляти нові типи конденсаційних поверхневих теплоутилізаторів на новій елементній базі в діапазоні змін швидкості потоку від 2 м/с до 20 м/с, температури потоку парогазової суміші (60-130)<sup>0</sup>С, температури поверхні труби (20-80)<sup>0</sup>С та концентрації водяних парів в потоці теплоносія (7-200) г/кг. Розроблені технічні, конструктивні та схемні рішення зі створення поверхневого конденсаційного теплоутилізатора зі зменшеними матеріальними та експлуатаційними витратами.

Результати теплоаеродинамічних розрахунків показали, що у конденсаційного теплоутилізатора, виконаного з оребрених плоскоовальних труб, масогабаритні характеристики на (20-25%) менші ніж у теплоутилізатора з оребрених біметалевих труб круглої форми при однаковій тепловій потужності апаратів.

**(рос.)**

Полномасштабное освоение в Украине огромного потенциала энергосбережения за счет утилизации теплоты уходящих газов промышленных энергетических и технологических установок, которые используют углеводородные топлива, невозможно без глубокого охлаждения этих газов в конденсационных теплоутилизаторах.

Сущность разработки заключается в применении в конденсационных теплоутилизаторах в качестве теплообменных поверхностей оребренных плоскоовальных труб, которые характеризуются малым аэродинамическим сопротивлением и сокращенной кормовой зоной накопления пленки конденсата. Кроме того, наличие системы эффективных прямоугольных ребер, приваренных к плоскоовальной трубе по сравнению с обычными круглыми ребрами приводит к повышению эффективности оребрения и увеличивает площадь поверхности контакта фаз при омывании ее парогазовой смесью в условиях глубокой утилизации.

Для ребристых плоскоовальных поверхностей, которые работают в условиях конденсации пара из парогазовой смеси, отсутствуют расчетные соотношения, которые могут быть положены в основу разработки современных методов теплоаэродинамических расчетов и оптимизации конструкций поверхностных конденсационных утилизаторов на основе высокоразвитых поверхностей с низким аэродинамическим сопротивлением.

В рамках выполненной научно-исследовательской работы изготовлены экспериментальные макеты из стальных плоскоовальных труб с неполным поперечным оребрением, геометрические характеристики которых лежат в диапазонах: поперечный и продольный размеры плоскоовальной трубы, соответственно  $d_1 = 15$  мм и  $d_2 = (30-42)$  мм; размеры ребер: высота  $h = (20-25)$  мм, длина  $l = (45-50)$  мм, толщина  $\delta = (0,8-1,0)$  мм, шаг между ребрами  $t = (3,5-4,0)$  мм.

Исследования тепломассообмена и аэродинамического сопротивления поверхностей из оребренных плоскоовальных труб в условиях конденсации водяного пара из продуктов сгорания проведены при широком варьировании их геометрических характеристик и скоростей потока. Определено влияние на тепломассообмен и сопротивление геометрических характеристик поверхностей и режимных факторов. Определена количественная связь и влияние концентрации водяного пара на интенсивность теплообмена, установлен оптимальный диапазон тепловых и аэродинамических характеристик оребренных поверхностей, которые работают в условиях капельно - пленочной конденсации водяного пара на поверхности, раскрыт механизм интенсификации теплообмена и характер гидродинамики потока парогазовой смеси при взаимодействии его с высокоразвитой оребреной поверхностью. На базе проведенных комплексных исследований предложены новые обобщающие зависимости для расчета тепломассообмена и аэродинамического сопротивления оребренных поверхностей из плоскоовальных труб, что расширяет класс задач, посвященных конденсации водяного пара из продуктов сгорания на теплообменной поверхности, а их

результаты являются основой для развития современных методов расчетов поверхностных конденсационных аппаратов.

По результатам экспериментальных исследований впервые получены инженерные методы теплового и аэродинамического расчетов поверхностей из оребренных плоскоовальных труб, которые позволяют разрабатывать новые типы конденсационных поверхностных теплоутилизаторов на новой элементной базе в диапазоне изменений скорости потока от 2 м/с до 20 м/с, температуры потока парогазовой смеси 60-130<sup>0</sup>С, температуры поверхности трубы 20-80<sup>0</sup>С и концентрации водяного пара в потоке теплоносителя (7-200) г/кг. Разработаны технические, конструктивные и схемные решения по созданию поверхностного конденсационного теплоутилизатора с уменьшенными материальными и эксплуатационными расходами.

Результаты теплоаэродинамических расчетов показали, что у конденсационного теплоутилизатора, выполненного из оребренных плоскоовальных труб, массогабаритные характеристики на (20-25%) меньше, чем у теплоутилизатора, выполненного из оребренных биметаллических труб круглой формы при одинаковой тепловой мощности аппаратов.

**(англ.)**

Full-scale development in Ukraine of a huge potential for energy saving due to the utilization of the heat of exhaust gases of industrial power and technological units that use hydrocarbon fuels is impossible without deep cooling of these gases in condensing heat exchangers.

The essence of the development is the use of condensed heat exchangers as heat exchange surfaces of finned flat-oval tubes, which are characterized by low aerodynamic drag and a reduced feeding zone of accumulation of the condensate film. In addition, the presence of a system of effective rectangular fins welded to a flat-oval tube in comparison with conventional round fins leads to an increase of the efficiency of the fin and increases the contact surface area of phases when it flowing of a vapor-gas mixture under conditions of deep utilization.

For finned flat-oval surfaces that work in the conditions of vapor condensation from a gas-vapor mixture, there are no calculated ratios that can be used as the basis for the development of modern methods for heat and aerodynamic calculations and optimization of designs of surfacing condensation heat exchangers, which are based on highly developed surfaces with low aerodynamic drag.

Within the framework of the research work, experimental models of steel flat-oval tubes with incomplete transverse fins are manufactured whose geometric characteristics lie in the following ranges: transverse and longitudinal dimensions of the flat-oval tube, respectively  $d_1 = 15$  mm and  $d_2 = (30-42)$  mm; dimensions of the fins: height  $h = (20-25)$  mm, length  $l = (45-50)$  mm, thickness  $\delta = (0.8-1.0)$  mm, pitch between fins  $t = (3.5-4.0)$  mm.

Studies of heat and mass transfer and aerodynamic drag of surfaces from finned flat-oval tubes under conditions of condensation of water vapor from combustion products are carried out with a wide variation of their geometric characteristics and flow velocity. The influence on heat and mass exchange and drag of geometrical characteristics of surfaces and regime factors is determined. The quantitative relationship and influence of the water vapor concentration on the heat transfer intensity is determined, the optimum range of thermal and aerodynamic characteristics of the finned surfaces is established, which operate under conditions of drop - film condensation of water vapor on the surface, the mechanism of heat exchange intensification and the hydrodynamic flow of the gas - vapor mixture flow interacting with the highly developed finned surface. On the basis of complex studies, new generalizing dependencies for the calculation of heat and mass transfer and aerodynamic drag of finned surfaces from flat-oval tubes have been proposed, which expands the class of problems devoted to the condensation of water vapor from combustion products on the heat exchange surface, and their results are the basis for the development of modern methods for calculating surface condensation apparatus.

Based on the results of experimental studies, engineering methods for the heat and aerodynamic calculations of surfaces from finned flat-oval tubes have been obtained for the first time. These methods allowing the development of new types of condensation surface heat recovery on a new element base in the range of flow velocity changes from 2 m/s to 20 m/s, the flow temperature of the combined vapor-gas mixture (60-130)°C, the surface temperature of the tube is (20-80)°C and the concentration of water vapor in the coolant flow (7-200) g/kg. Technical, constructive and schematic solutions for creating a surface condensation heat exchanger with reduced material and operating costs have been developed.

The results of the thermoaerodynamic calculations showed that the condensation heat exchanger made from finned flat-oval pipes has a mass-dimensional characteristics of (20-25%) less than that of the heat exchanger made of a traditional round-shaped finned bimetallic tubes with the same heat power of the apparatus.

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

##### **- патенти**

1. Патент на корисну модель №102689. Теплообмінник / Письменний Є.М., Туз В.О., Ніщик О.П., Руденко О.І., Терех О.М., 10.11.2015. Бюл. №21.

2. Патент на корисну модель №102689. Деаератор / Письменний Є.М., Руденко О.І., Ніщик О.П., Терех О.М., Вознюк М.М., 25.07.2016. Бюл. №14/2016.

3. Патент на корисну модель №110702. Спосіб енергозбереження при експлуатації апарату повітряного охолодження / Письменний Є.М., Терех О.М., Руденко О.І., Ніщик О.П., Вознюк М.М., 25.10.2016. Бюл. №20.

4. Патент на корисну модель №116108. Конденсатор / Руденко О.І., Трокоз Я.Є., Туз В.О., Ніщик О.П., Терех О.М., 10.05.2017. Бюл. №9.

5. Патент на корисну модель №117554. Теплообмінна біметалева труба / Ніщик О.П., Руденко О.І., Терех О.М., Письменний Є.М., Вознюк М.М., Рогачов В.А., 26.06.2017. Бюл. №12.

6. Патент на корисну модель № 120616. Пристрій для нагрівання і термообробки в'язкого матеріалу / Ніщик О.П., Руденко О.І., Терех О.М., Підлісна О.А., Рогачов В.А., 10.11.2017. Бюл. №21.

7. Патент на корисну модель № 120682 Теплообмінна труба / Рогачов В.А., Письменний Є. М., Ніщик О.П., Терех О.М., Руденко О.І., Баранюк О.В. 10.11.2017. Бюл. № 21.

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

Попередній аналіз та систематизація світових наукових і технологічних досягнень показав суттєву недостатність фундаментальних досліджень, щодо розкриття механізмів і явищ, які впливають на процеси тепломасообміну у теплообмінних поверхнях з оребрених плоскоовальних труб, що омиваються потоком суміші водяних парів та некондесованих газів. Дослідження впливу на теплоаеродинамічні характеристики геометричних параметрів поверхні з оребрених труб плоскоовального профілю в широкому діапазоні їх змін при поперечному обтіканні потоком відхідних димових газів в Україні і світі зовсім не проводились. До теперішнього часу немає взагалі розрахункових співвідношень для обчислення значень коефіцієнтів аеродинамічного опору і тепломасообміну для поверхонь з таких труб, а також бази даних для вибору їх оптимальних геометричних розмірів, що стримує їх подальше впровадження в енергозберігаючі технології теплоенергетичної галузі. Проведені окремі дослідження тепломасовіддачі та аеродинамічного опору для умов глибокого охолодження димовими газами поверхонь з поодиноких оребрених біметалічних труб круглої форми та в обмеженому діапазоні геометричних параметрів їх пакетів.

#### **6. Економічна привабливість розробки для просування на ринок.**

Порівняння теплоаеродинамічних характеристик економайзерних поверхонь конденсаційних теплоутилізаторів котлоагрегатів з оребрених круглих та плоскоовальних труб показало відсутність термічного контактного опору та збільшення коефіцієнта теплопередавання в 1,2-1,3 разів у поверхнях з оребрених плоскоовальних труб, що призводить до істотного зменшення загальної довжини труб та маси поверхні на 20-30%, зменшення гибів труб та отворів в колекторах. Сумарні втрати тиску по газовому тракту, внаслідок зменшення загальної довжини труб та зміни профілю труб на плоскоовальний знижуються у 1,3-1,6 разів, що призводить до зменшення витрат енергії на прокачування димових газів, а отже власні потреби, при одночасному збільшенні теплової потужності котлоагрегату. Вартість оребреної труби плоскоовального перерізу порівняно з оребреною біметалічною круглою трубою менше у 1,2-1,3 рази.

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

Користувачами результатів роботи можуть бути проектні організації і промислові підприємства, що розробляють нові та удосконалюють існуючі компактні теплообмінні апарати в яких в якості теплообінних поверхонь використовуються ребристі труби.

Імовірні замовники результатів роботи:

- галузі: хімічне, унергетичне машинобудування, теплоенергетика, нафтопереробка;
- підприємства: ТОВ СПКТБ “ЕНЕРГОМАШПРОЕКТ” (м. Київ), ПАТ „Факел”, (м. Фастів), ПАТ «Сумське НВО ім. Фрунзе» (м. Суми), ТОВ DEMO Ltd (м. Київ).

#### **8. Стан готовності розробки.**

На сьогодні розроблено нові, надійні інженерні методи розрахунку тепломасообміну і аеродинамічного опору поодиноких ребристих труб плоскоовальної форми та їх пакетів для теплообмінних апаратів, які працюють в умовах конденсації водяної пари з парогазової суміші, в широкому діапазоні зміни режимних параметрів. Розроблені технічні рекомендації по конструюванню перспективного поверхневого конденсаційного теплоутилізатора.

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

Результати досліджень використані на теплоенергетичному факультеті в учбовому процесі: в дисципліну „Діагностика та надійність котлів” введена нова лекція „Підвищення ефективності та економія палива у паровому котлі шляхом застосування поверхонь нагріву конденсаційного типу”. Введена лабораторна робота „Дослідження конденсаційних процесів в теплообмінних апаратах другого контуру АЕС” та лабораторна робота „Моделювання паровмісту в вертикальному каналі засобами CFX”.

#### **10. Форма участі інвестора.**

Краща форма участі в реалізації результатів проекту інвестора - частка в проекті %.

#### **11. Обсяг інвестицій.**

Необхідна для впровадження результатів проекту сума інвестицій становить 200 тис. доларів США.

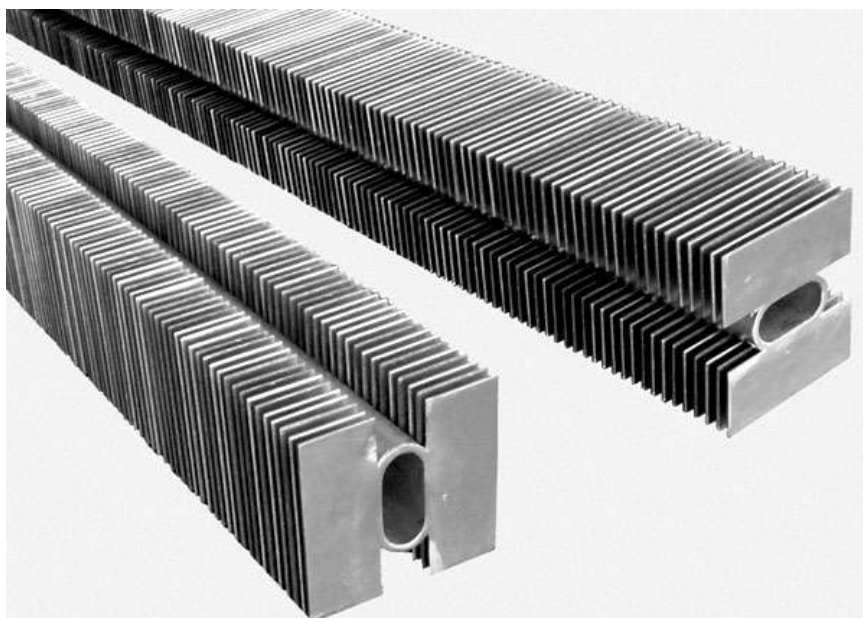
#### **12. Мега інвестицій.**

Розширення бізнесу.

#### **13. Назва організації, телефон, e-mail.**

КПІ ім. Ігоря Сікорського, теплоенергетичний факультет (ТЕФ), кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики (АЕС і ІТФ), науково-дослідна лабораторія (НДЛ) “Теплофізичні дослідження” робочий тел. факс: (044) 204-95-26, (044) 204-97-87, [nirtef@kpi.ua](mailto:nirtef@kpi.ua)

**14. Фото або слайди (декілька фото) презентації розробки в електронному вигляді (рекламного характеру):**



Експериментальні натурні макети ребристих труб плоскоовальної форми

**15. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання.**

1. Навчальний посібник до практичних занять з грифом „КПІ ім. Ігоря Сікорського”. Письменний Є.М., Рогачев В.А., Баранюк О.В., Вознюк М.М. Теплообмінні апарати систем повітряного охолодження ТЕС та АЕС. – К.: „КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2016. – 87 с.

2. Навчальний посібник до практичних занять з грифом „КПІ ім. Ігоря Сікорського”. Рогачев В.А., Баранюк О.В., Терех О.М., Руденко О.І. Теплоаеродинамічні та гідравлічні розрахунки теплообмінних поверхонь енергетичних установок ТЕС. – К.: „КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2017. – 115 с.

3. Руденко О.І. Оцінка теплоаеродинамічної ефективності поодиноких труб різного поперечного перерізу/ О. І. Руденко, О. М. Терех, В. О. Туз, В. А. Рогачов// Scientific Journal «ScienceRise». – 2015. – №2/2(7). – С. 7-11.

4. Кондратюк В.А. Теплообмін та аеродинамічний опір шахових пакетів плоскоовальних труб з лунками / Кондратюк В.А., Письменний Є.М., Терех О.М. // Scientific Journal «ScienceRise». – 2015. – №11/2 (16). – С. 10-14.

5. 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.

6. 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.

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

8. Письменний Є. М. Аналіз експериментальних даних з аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб / Є. М. Письменний, В.А. Кондратюк, О. М. Терех, О.І. Руденко, О.В. Баранюк // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №6/8 (78). – С. 19-24.

9. Терех, О. М. Аеродинамічний опір двох поруч розташованих труб різної форми / О. М. Терех, О. І. Руденко, Ю. В. Жукова, В. А. Рогачов, О. В. Баранюк // Науковий журнал „ScienceRise”. – 2016. – № 6/2(23) – С. 40-44.

10. Туз В. О. Тепломасообмін в фільтр-сепараторі паливної системи ГТУ ГПА / В. О. Туз, Я. Є. Трокоз, Н. Л. Лебедь // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2016. – № 10. – С. 25-27.

11. Вознюк М. М. Теплообмін пакетів плоскоовальних оребрених труб в умовах вільної конвекції і природної тяги / М. М. Вознюк, В. А. Рогачов, О. М. Терех, О. В. Баранюк // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. № 2. – С. 46-53.

12. Вознюк М. М. Оптимальная высота поперечных ребер плоскоовальной трубы / М.М. Вознюк, А.В. Семеняко, В.А. Бондарь // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. № 4. – С. 60-65.

13. Руденко О. І. Інноваційне енергозберігаюче устаткування для підприємств теплокомунальної енергетики / О. І. Руденко, О. О. Мезенцева, О. М. Терех, М. М. Вознюк // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія „Економіка”. – 2016. – № 2 (47). – С. 234-238.

14. Баранюк А. В. Численное моделирование конвективного теплообмена и аэродинамики поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением / А. В. Баранюк, В. А. Рогачев, А. М. Терех, А. И. Руденко // Вісник НТУ „ХПІ”. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2017. № 9. – С. 64-70.

15. Письменний Є. М. Теплоаеродинамічна ефективність пакетів гвинтоподібних труб / Є. М. Письменний, С. В. Рева, О. М. Терех, О. В. Баранюк // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2017. – № 2. – С. 7-11.

16. Туз В. О. Особливості гідродинаміки двофазних систем на вертикальних поверхнях / В. О. Туз, Н. Л. Лебедь, Я. Є. Трокоз, І. К. Лебедь // Труды XVII международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». г. Одесса, Украина. 23-27 мая 2016 г. – С. 168-169.

**16. Ключові слова:** ПРОФІЛЬОВАНА ОРЕБРЕНА ТРУБА, ПАКЕТ, КОНДЕНСАЦІЯ, ТЕПЛОМАСООБМІН, АЕРОДИНАМІЧНИЙ ОПІР, МЕТОД РОЗРАХУНКУ, ТЕХНІЧНІ, КОНСТРУКТИВНІ, СХЕМНІ РІШЕННЯ, ПОВЕРХНЕВИЙ КОНДЕНСАЦІЙНИЙ ТЕПЛОУТИЛІЗАТОР.