

УДК 621.45.026

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ЦИКЛА БРАЙТОНА С ПЕРЕМЕННЫМИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ РАБОЧЕГО ТЕЛА. ЧАСТЬ 1

Халатов А.А., академик НАН Украины, **Северин С.Д.**, канд. техн. наук, **Ступак О.С.**

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2019.1>

Прагнення до підвищення термодинамічної ефективності енергетичних машин і установок у разі призводить до широкого використання газотурбінних установок з регенерацією теплоти в циклі. Такі установки застосовуються в якості енергетичних і транспортних ГТУ, а також в якості блоків перетворення енергії перспективних атомних електростанцій четвертого покоління. У даній роботі розглядається термодинамічна ефективність ідеального циклу Брайтона з регенерацією теплоти з постійними теплофізичними властивостями робочого тіла, а також циклу Брайтона з регенерацією теплоти і зволоженням робочого тіла на вході в турбіну (зі змінними теплофізичними властивостями робочого тіла). Показана непридатність порівняння термічного ККД циклу Брайтона з регенерацією теплоти і зволоженням робочого тіла на вході в турбіну з термічним ККД еквівалентного ідеального циклу Карно.

Стремление к повышению термодинамической эффективности энергетических машин и установок в настоящее время приводит широкому использованию газотурбинных установок с регенерацией теплоты в цикле. Такие установки находят применение в качестве энергетических и транспортных ГТУ, а также в качестве блоков преобразования энергии перспективных атомных электростанций четвертого поколения. В настоящей работе рассматривается термодинамическая эффективность идеального цикла Брайтона с регенерацией теплоты с постоянными теплофизическими свойствами рабочего тела, а также цикла Брайтона с регенерацией теплоты и увлажнением рабочего тела на входе в турбину (с переменными теплофизическими свойствами рабочего тела). Показана неприменимость сравнения термического КПД цикла Брайтона с регенерацией теплоты и увлажнением рабочего тела на входе в турбину с термическим КПД эквивалентного идеального цикла Карно.

The desire to increase the thermodynamic efficiency of power machines and units now leads to use of gas turbine units with heat recovery in the cycle. Such devices are used as power and transport GTUs, as well as energy conversion units for prospective fourth generation nuclear power plants. Thermodynamic efficiency of the ideal Brighton cycle with heat regeneration with constant thermophysical properties of the working fluid, as well as the Brighton cycle with heat recovery and the wetting of the working fluid at the inlet to the turbine (with variable thermophysical properties of the working fluid) is considered in this paper. The inapplicability of comparison of the thermal efficiency of the Brighton cycle with heat recovery and the wetting of the working fluid at the inlet to the turbine with the thermal efficiency of the equivalent ideal Carnot cycle is shown.

Библиогр. 6, рис. 3.

Ключевые слова: КПД, цикл Брайтона, регенерация теплоты, переменные теплофизические свойства рабочего тела.

$\sigma_{\text{рег}}$ – степень регенерации теплоты в цикле;
 q – удельная теплота, [кДж/кг];
 T – температура, [К];
 h – энтальпия, [кДж/кг];
 η_t – термический КПД;
 C_p – теплоёмкость, [кДж/кг К];
 P – давление, [Па];

τ – температурный коэффициент;
 π – степень повышения давления;
 d – влагосодержание, [г/кг];
 ϕ – коэффициент, характеризующий изменение изобарной теплоёмкости рабочего тела в цикле;
 k – показатель адиабаты.

Цикл Брайтона с регенерацией теплоты и $C_p = \text{const}$

Рассмотрим энергетический цикл Брайтона с регенерацией теплоты. Регенерация теплоты в цикле Брайтона становится возможной в том случае, когда температура газов на выходе из турбины больше, чем температура воздуха на выходе из компрессора. В этом случае, появляется возможность установки теплообменника на выходе из турбины, в котором часть теплоты уходящих

газов можно передать более холодному воздуху, выходящему из компрессора. Этот теплообменник принято называть **регенератором теплоты** или **рекуператором**. Схема регенеративного цикла Брайтона представлена на рисунке 1.

Определим степень регенерации теплоты в цикле ($\sigma_{\text{рег}}$), как отношение действительного количества теплоты переданного в регенераторе воздуху за компрессором к максимально возможному количеству теплоты,

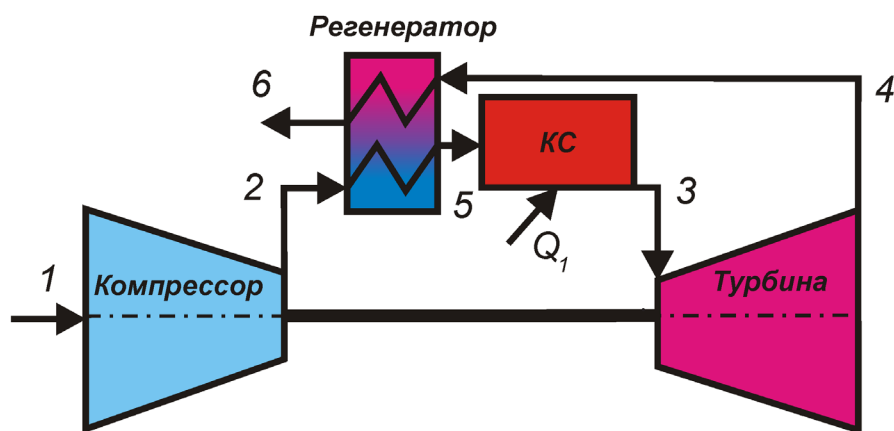


Рис. 1. Схема газотурбинной установки с регенерацией теплоты.

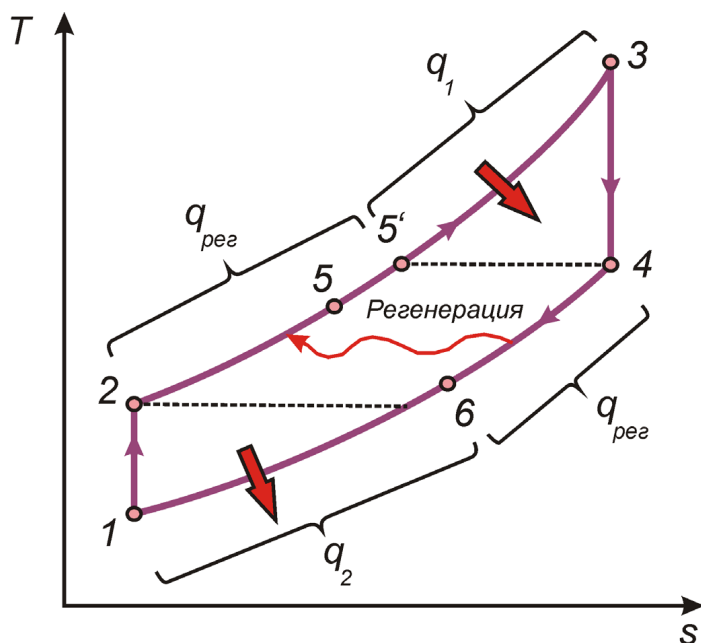


Рис. 2. T-s диаграмма цикла Брайтона с регенерацией теплоты.

которое теоретически могло бы быть возвращено в цикл (рис. 2):

$$\sigma_{рег} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2}. \quad (2)$$

$$\sigma_{рег} = \frac{q_{рег, действ}}{q_{рег, макс}}, \quad (1)$$

Для идеальных газов с постоянной удельной теплоемкостью степень регенерации цикла определяется выражением:

$$\sigma_{рег} \cong \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \quad (3)$$

где

$$q_{рег} = h_5 - h_2; \quad q_{рег, макс} = h_{5'} - h_2 = h_4 - h_2.$$

Таким образом, степень регенерации цикла Брайтона с регенерацией теплоты будет определяться из выражения [5]:

Используя метод анализа замкнутых циклов, и счи-

тая процессы передачи теплоты в цикле стационарными, термический КПД реального регенеративного цикла Брайтона найдём из следующего выражения:

$$\eta_{t,рег} \cong 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{h_6 - h_1}{h_3 - h_5} = 1 - \frac{C_{p6}T_6 - C_{p1}T_1}{C_{p3}T_3 - C_{p5}T_5}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что теплота, передаваемая рабочему телу в регенераторе, не входит в выражение для термического КПД, поскольку эта теплота не передаётся за пределы контура цикла.

Считая регенератор идеальным теплообменником ($\sigma_{рег} = 1$), и постоянной удельную теплоёмкость рабочего тела в процессах цикла, выражение для термического КПД регенеративного цикла будет иметь следующий вид:

$$\eta_{t,рег} = 1 - \frac{T_6 - T_1}{T_3 - T_5}. \quad (5)$$

Из принятого допущения $\sigma_{рег} = 1$ следует $\frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} = 1$ и $T_5 = T_4$, а $T_6 = T_2$.

Тогда выражение для термического КПД регенеративного цикла можно записать в виде:

$$\eta_{t,рег} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}{T_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3} \right)}. \quad (6)$$

Считая процессы 1-2 и 3-4 изэнтропическими, можно выразить отношения характерных температур через отношения давлений:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \text{и} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Поскольку в данном случае рассматривается идеальный цикл, в котором процессы подвода и отвода теплоты считаются изобарными, то в изобарных процессах 2-3 и 3-4 $P_2 = P_3$ и $P_1 = P_4$.

Отношение давлений $\pi = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$ представляет собой **степень повышения давления** в идеальном регенеративном цикле, а отношение температур $\tau = \frac{T_1}{T_3}$ – тем-

пературный коэффициент идеального регенеративного цикла [5].

Тогда с учетом введенных обозначений выражение для термического КПД идеального регенеративного цикла Брайтона можно представить в следующем виде:

$$\eta_{t,рег} = 1 - \tau \frac{\left(\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{\left(1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \right)} = 1 - \tau \cdot \pi^{\frac{k-1}{k}}. \quad (7)$$

Можно показать также, что для идеального цикла Брайтона без регенерации теплоты термический КПД цикла определяется выражением:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (8)$$

Как следует из выражений (7) и (8) термический КПД идеального цикла Брайтона зависит только от степени повышения давления в цикле, в то время, как термический КПД идеального регенеративного цикла Брайтона зависит от степени повышения давления в цикле и от температурного коэффициента цикла.

Возникает вопрос, в каких случаях значения термического КПД идеального регенеративного цикла Брайтона и обычного цикла Брайтона равны между собой? Для ответа на этот вопрос необходимо приравнять выражения (7) и (8):

$$\eta_{t,рег} = \eta_t; \quad 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \tau \cdot \pi^{\frac{k-1}{k}},$$

откуда получим

$$\pi = \tau^{\frac{k}{2(k-1)}}. \quad (9)$$

Степень повышения давления, определяемая выражением (9), соответствует максимальной работе обычного цикла Брайтона. Для фиксированного значения

температурного коефіцієнта (τ) значення ступеня підвищення тиску більше, ніж визначені за виразом (9), призводять до того, що температура T_4 стає менше, ніж T_2 і регенерація теплоти в циклі стає неможливою.

Ефективність енергетических циклів прийнято порівнювати з ефективністю ідеального циклу Карно, термічний КПД якого визначається за виразом;

$$\eta_{t,k} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \tau. \quad (10)$$

Як відомо, ідеальний цикл Карно, що складається з рівноважних адиабатних процесів стиснення і розширення і ізотермічних процесів підводу (відводу) теплоти, визначає максимальне значення термічного КПД циклу при заданому значенні його температурного коефіцієнта (максимальної і мінімальної температури циклу).

На рисунку 3 представлені залежності термічного КПД регенеративного циклу Брайтона з незмінними теплофізическими властивостями робочого тіла від ступеня підвищення тиску в циклі для різних значень температурного коефіцієнта, розраховані за формулами (7) і (8).

Як видно з рисунка, в відмінність від залежності термічного КПД звичайного циклу Брайтона, термічний КПД регенеративного циклу Брайтона зменшується з ростом ступеня підвищення тиску в циклі і при збільшенні температурного коефіцієнта циклу. Причому, в усьому діапазоні зміни ступеня підвищення тиску в циклі (при $\pi > 1$) значення його термічного КПД менше, ніж значення КПД еквівалентного циклу Карно. Як випливає з виразу (7), при $\pi = 1$ термічний КПД регенеративного циклу Брайтона стає рівним КПД циклу Карно, а робота циклу при цьому дорівнює нулю. З рисунка також випливає, що більш високі значення термічного КПД регенеративного циклу Брайтона відповідають відносно невисоким значенням ступеня підвищення тиску в циклі.

Во другій частині статті буде розглянуто цикл Брайтона з регенерацією теплоти і $C_p = \text{const}$.

Висновки

Аналіз термодинамічної ефективності ідеального регенеративного циклу Брайтона з зволоженням робочого тіла на вході в турбіну дозволяє зробити наступні висновки:

1. З ростом масового вмісту вологи робочого тіла на вході в турбіну термічний КПД регенератив-

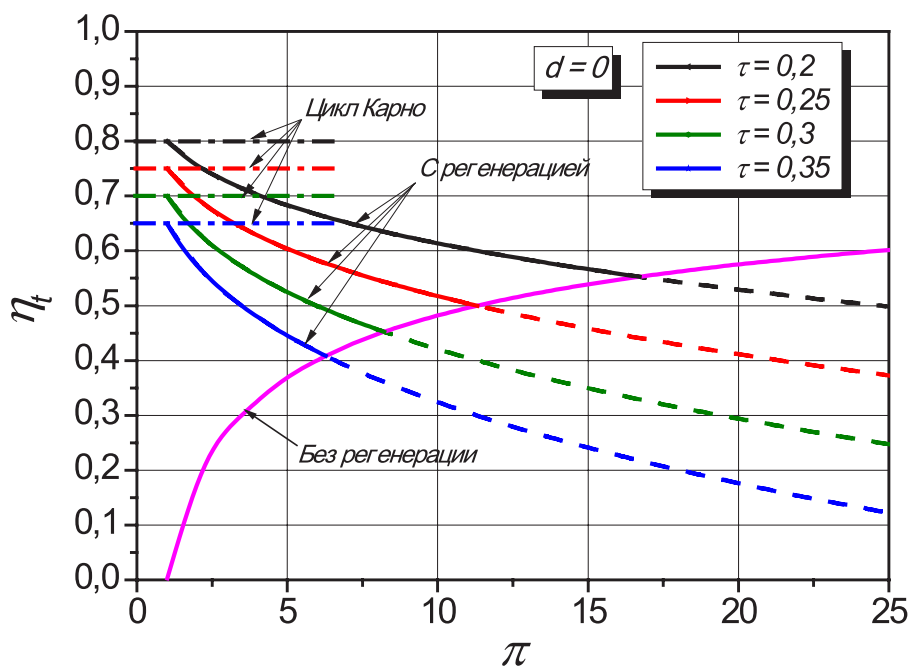


Рис. 3. Залежності термічного КПД регенеративного та простого циклів Брайтона з $C_p = \text{const}$ від ступеня підвищення тиску в циклі для різних значень температурного коефіцієнта.

ного цикла возрастает, и уменьшается с увеличением степени повышения давления в цикле.

2. Высокие значения термического КПД цикла ($\eta_t = 80...87\%$) можно достичь при сравнительно невысоких значениях степени повышения давления в цикле ($\pi < 5$) и высоких (до $d=0,5$) значениях массового влагосодержания рабочего тела на входе в турбину.

3. Показано, что при определённых условиях термический КПД регенеративного цикла с увлажнением рабочего тела на входе в турбину может быть больше, чем термический КПД эквивалентного идеального цикла Карно, что не противоречит второму закону термодинамики, поскольку условием реализации цикла Карно является неизменность теплофизических свойств рабочего тела в цикле. В этой связи, использование выражения для термического КПД идеального цикла Карно не применимо в качестве критерия оценки эффективности циклов энергетических установок с сильно меняющимися теплофизическими свойствами рабочего тела.

4. Показано также, что термический КПД регенеративного цикла с увлажнением рабочего тела на входе в турбину всегда ниже, чем термический КПД эквивалентного неравновесного цикла Карно с переменной удельной теплоёмкостью рабочего тела, что соответствует второму закону термодинамики.

5. Показано, что регенеративный цикл Брайтона с увлажнением рабочего тела перед турбиной можно представить в виде условного цикла с более высокой максимальной температурой цикла, которая в зависимости от величины массового влагосодержания рабочего тела может в 1,2...2,5 раза превышать действительную максимальную температуру цикла, что и обуславливает высокие значения его термического КПД.

ЛІТЕРАТУРА

1. В.П. Бурдаков Термодинамика: учебное пособие для вузов. В 2 ч. / В.П.Бурдаков, Б.В.Дзюбенко, С.Ю.Меснянкин, Т.В.Михайлова. – М.: Дрофа, 2009, Ч 1 Основной курс. – 479 с., Ч 2 Специальный курс. – 361 с.
2. С.И. Бурцев, Ю.Н. Цветков Влажный воздух. Состав и свойства: Учеб. пособие. СПб.: СПб ГАХИТ, 1998. 146 с.
3. И.И. Новиков Термодинамика: Учеб. пособие для студентов энергомашиностроительных и теплотехнических специальностей вузов. - М.: Машиностроение, 1984. — 592 с.
4. В.А.Кудинов, Э.М. Карташов Техническая термодинамика. Учеб. пособие для вузов. М: Высш. шк., 2000.- 261 с.
5. Газотурбинные установки: конструкция и расчёт: Справочное пособие Под ред. Л.В. Арсеньева и В.Г. Тырышкина Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
6. А.А. Халатов, А.С.Коваленко, С.Д.Северин, Г.В.Коваленко, Возможности повышения эффективности воздушной утилизации теплоты за газотурбинными приводами. Промышленная теплотехника, 2015, т. 37, №6, - С. 21-30.

EFFICIENCY OF THE REGENERATIVE CYCLE OF BRIGHTON WITH VARIABLE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE WORKING FLUID (Part 1)

Khalatov A.A., Severin S.D., Stupak O.S.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.1>

The data about thermodynamic efficiency of the ideal Brighton cycle with heat regeneration with constant thermophysical properties of the working fluid, as well as the Brighton cycle with heat recovery and the wetting of the working fluid at the inlet to the turbine (with variable thermophysical properties of the working fluid). The inapplicability of comparison of the thermal efficiency of the Brighton cycle with heat recovery and the wetting of the working fluid at the inlet to the turbine with the thermal efficiency of the equivalent ideal Carnot cycle is shown.

The analysis of the thermodynamic efficiency of an ideal regenerative Brighton cycle with a decrease in the working body at the entrance to the turbine allows us to make the following conclusions:

1. With the growth of the mass moisture content of the working fluid when entering the turbine, the thermal efficiency of the regenerative cycle increases, but decreases with an increase in the degree of increase in the pressure level in the cycle.

2. High values of the thermal efficiency of the cycle can be achieved with relatively small values of the degree of increase in the pressure in the cycle and high (up to $d = 0,5$) values of the mass moisture content of the working body when entering the turbine.

3. It is shown that under certain conditions the thermal efficiency of the regenerative cycle with the decrease of the working body when entering the turbine may be greater than the thermal efficiency of a similar ideal Carnot cycle, which does not contradict the second law of thermodynamics, since the condition for the implementation of the Carnot cycle is the immutability of the thermophysical properties of the working body in a loop. In this regard, the use of the expression for the thermal efficiency of the ideal Carnot cycle is not used as a criterion for assessing the efficiency of cycles of power plants with highly variable thermophysical properties of the working fluid.

4. It is also shown that the thermal efficiency of the regenerative cycle with the decrease of the working body when entering the turbine is always lower than the thermal efficiency of the equivalent non-equilibrium Carnot cycle with a change in the specific heat of the working fluid, which corresponds to the second law of thermodynamics.

5. It is shown that the Brighton regenerative cycle with a decrease in the working body before the turbine can be represented as a conditional cycle with a higher maximum temperature of the cycle, which, depending on the mass content of the moisture content of the working body, can in 1,2 ... 2,5 times exceed the actual maximum temperature cycle, which determines the high values of its thermal efficiency.

Key words: Brighton cycle with heat recovery, variable thermophysical properties of the working fluid, efficiency.

References 6, figures 3.

1. Burdakov V.P., Dzyubenko B.V., Mysnyankin S.Yu., Mihaylova T.V., [Thermodynamics: a textbook for high schools.]. Moscow: Drofa, 2009. Vol. 1. 479 p., Vol. 2. 361 p. [in Russian].

2. Burtsev S.I., Tsvetkov Yu.N. [Wet air. Composition and properties: Tutorial.] St. Petersburg: SPb GAHPT. 1998. 146 p. [in Russian].

3. Novikov I.I. [Thermodynamics: A manual for students of power engineering and heat engineering specialties of technical colleges.] Moscow: Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1984. 592 p. [in Russian].

4. Kudinov V.A., Kartashov E.M. [Technical thermodynamics. Textbook for technical colleges.] Moscow: Vysshaya shkola [High school], 2000. 261 p. [in Russian].

5. Arseniev L.V. & Tyryshkina V.G. (Ed.). [Gas turbine installations: design and calculation: Reference guide.] Leningrad: Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1978. 232 p. [in Russian].

6. Khalatov A.A., Kovalenko A.S., Severin S.D., Kovalenko G.V. [Possibilities of increasing the efficiency of air heat utilization for gas turbine drives.] Promyshlennaya teploekhnika [Industrial Heat Engineering], 2015. V. 37. № 6. P. 21–30. [in Russian].

Отримано 13.02.2019

Received 13.02.2019

УДК 536.24:541.11

ОСОБЛИВОСТІ ОБТІКАННЯ ТА ТЕПЛОВІДДАЧІ ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ЦИЛІНДРІВ ЗІ СПІРАЛЬНИМИ КАНАВКАМИ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З ПОПЕРЕЧНИМ ПОТОКОМ ПОВІТРЯ

Халатов А. А.^{1,2}, академік НАН України, **Коваленко Г. В.**¹, канд. техн. наук,
Мулярчук М. А.², аспірант

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут, пр. Перемоги 37, Київ, 03056, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.2>

Представлені результати експериментального дослідження середньої тепловіддачі, гідравлічного опору та вихрової структури при поперечному обтіканні повітрям пучка кругових циліндрів зі спіральними канавками на зовнішній поверхні. Отримані рівняння подібності для середньої тепловіддачі і для гідравлічного опору.

Представлены результаты экспериментального исследования средней теплоотдачи, гидравлического сопротивления и вихревой структуры при поперечном обтекании воздухом однорядного пучка круговых цилиндров со спиральными канавками на внешней поверхности. Получены уравнения подобия для средней теплоотдачи и для гидравлического сопротивления.

The results of an experimental study of the average heat transfer, hydraulic resistance and vortex structure at the cross flow of a single-row of round cylinders with spiral grooves on the external surface are presented. The equations of similarity on the average heat transfer and hydraulic resistance were obtained.

Бібл. 9, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: гідродинаміка, теплообмін, циліндр, спіральні канавки.

ampl – амплітуда імпульсу сенсора тиску;

D – діаметр циліндру;

l – робоча довжина циліндру;

N – число імпульсів однакової величини сенсора тиску;

p – тиск;

s_l – поперечний крок розташування циліндрів у пучку;

t – час;

w – швидкість потоку;

f – частота;

Критерії:

Eu – число Ейлера;

Nu – число Нуссельта;

Re – число Рейнольдса;

Sh – число Струхала;

Нижні індекси:

o – гладка поверхня;

w – стінка;

1 – вхід в робочу ділянку;

2 – вихід з робочої ділянки.

Актуальність роботи. Круглі циліндри при поперечному обтіканні повітрям чи рідиною є складовим елементом багатьох технічних пристроїв. На відміну від пластинчастих теплообмінників, які часто бувають компактними і економічними, трубчасті теплообмінники більш надійні і довговічні, особливо якщо потоки в теплообміннику перебувають під різним тиском [1]. Основним методом збільшення передачі теплоти є оребрення різноманітної форми [2]; однак воно характеризується збільшеною вагою теплообмінного обладнання і підвищенням втрат тиску. Як показали дослідження, виконані в роботах [3,4], застосування заглиблень на теплообмінній поверхні труби істотно покращують теплогідравлічні і масогабаритні харак-

теристики обладнання. Ці дослідження підтвердили раніше зроблений висновок про те, що заглиблення різної форми на теплообмінній поверхні дозволяють інтенсифікувати теплообмін при зменшених втратах тиску [4]. Одним з варіантів заглиблення на поверхні є спіральна канавка прямокутного перерізу на зовнішній поверхні труби, яка генерує вихрові структури. На жаль, ця технологія на сьогодні досліджена слабо і потребує більш детального дослідження.

Метою даної роботи є експериментальне дослідження середнього теплообміну та гідравлічного опору при обтіканні повітрям однорядного пучка кругових циліндрів з одно- і двозахідною гвинтовою канавкою прямокутного перерізу. Дослідження виконува-

лось в діапазоні числа Рейнольдса Re від 2000 до 17000, розрахованого по зовнішньому діаметру циліндру. Цей діапазон чисел Рейнольдса є найбільш цікавим з практичної точки зору.

Експериментальна установка і методика проведення дослідів

Схема експериментальної установки показана на рис. 1. Вона являє собою газодинамічний контур відкритого типу, який працює за рахунок всмоктування зовнішнього повітря вентилятором 1. Повітряний потік надходить у вхідний канал контуру, в якому розташовано вимірювач витрати (чашковий анемометр) 5, проходить через хонейкомб 4, який слугує для забезпечення рівномірного поля швидкостей по перерізу каналу, і поступає до робочої ділянки, в якій встановлено однорядний пучок циліндрів з п'яти трубок, середня з яких є калориметром для визначення середньої тепловіддачі. Перед вентилятором, існує додатковий патрубок з вентилем 3 для підсмоктування повітря із атмосфери з ме-

тою регулювання витрати основного потоку (в бік його зменшення). Стінки каналу робочої ділянки виготовлено з оргскла з шорсткістю поверхні не більше $Rz = 1,0$ мкм. Загальна довжина каналу 970 мм.

Діаметр всіх циліндрів D складає 22 мм, довжина кожної трубки дорівнює 220 мм, а робоча довжина, в межах поперечного перерізу каналу, $l = 105$ мм. Відносний поперечний крок розташування циліндрів у однорядному пучку складає $s_l/D = 1,7$. Досліджено 3 труби з різним кроком спіральної канавки з одним або двома заходами, а також гладка труба для порівняння.

Для визначення середньої тепловіддачі використовувався метод танення льоду [6]. Досліджуваний циліндр-калориметр розміщувався в середній частині однорядного пучка. В роботі [6] було показано, що при використанні методу танення льоду на холодній поверхні циліндра-калориметр випадає волога. З рис. 2 видно, що на відміну від гладкого циліндра при обтіканні циліндра з гвинтовою канавкою, з притаманною йому асиметрією

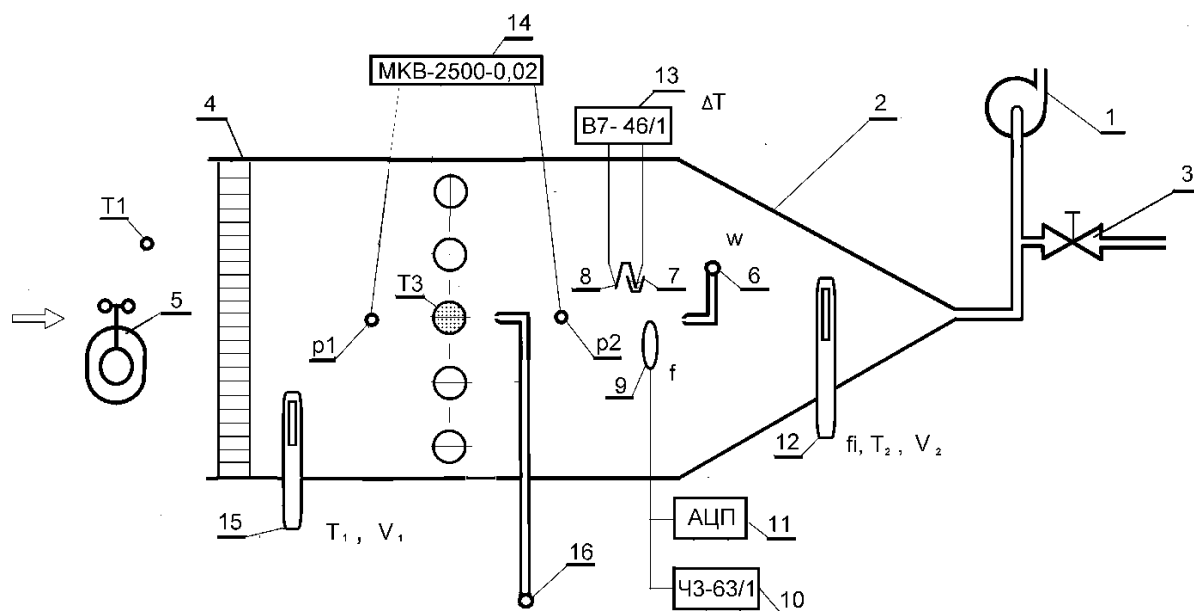
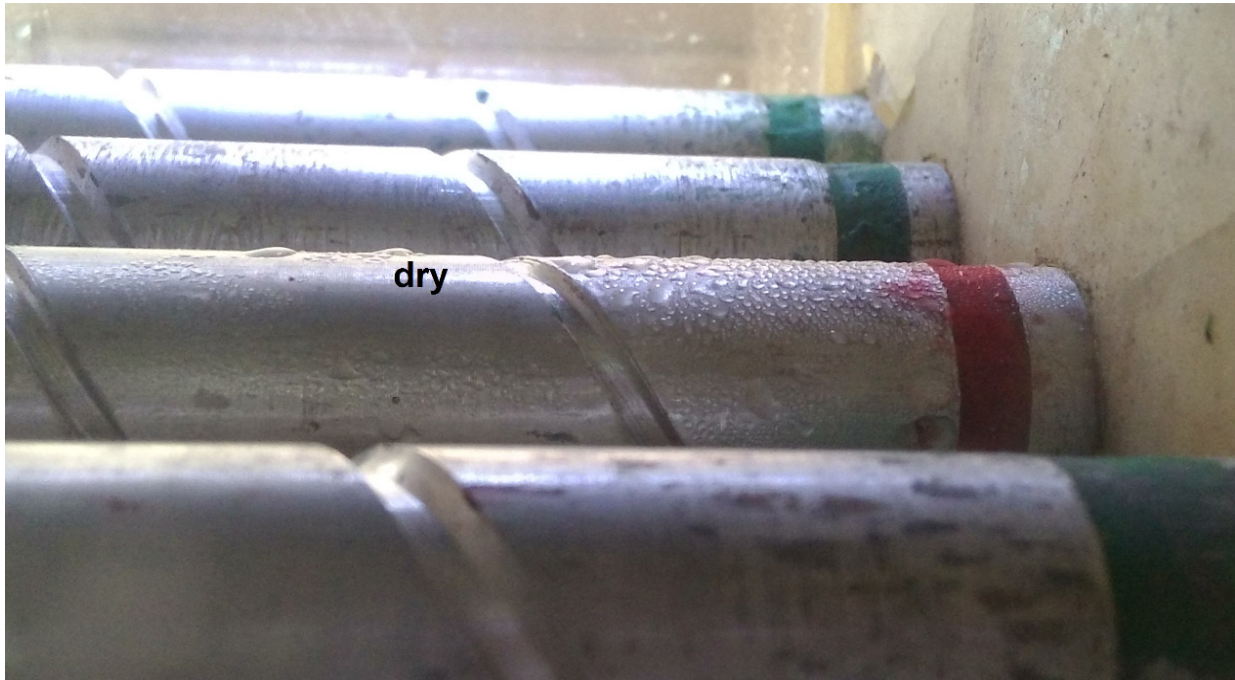


Рис. 1. Схема експериментальної установки:

- 1 – вентилятор; 2 – конічна частина робочої ділянки; 3 – регулюючий вентиль; 4 – хонейкомб;
5 – вхідний анемометр; 6 – рухома трубка Піто (повздовжня координата); 7 – волога термopapa;
8 – суха термopapa; 9 – п'єзокерамічний давач; 10 – частотомір; 11 – аналого-цифровий перетворювач;
12 – вимірювач відносної вологості, температури, швидкості;
13 – цифровий вольтметр; 14 – мікроманометр; 15 – вимірювач швидкості повітря і
температури; 16 – рухома трубка Піто (поперечна координата); T1 – ртутний термометр;
T3 – льодовий калориметр; p1, p2 – заміри статичного тиску для визначення гідравлічного опору.

Таблиця 1. Параметри циліндрів

Умовне позначення	Крок спіралі, мм	Кількість заходів
SPI_40	40	1
SPI_40_2	40	2
SPI_10	10	1
Sm	Гладкий циліндр	



*Рис. 2. Конденсація вологи на циліндрі-калориметрі;
dry – область зменшеної концентрації сконденсованої вологи.*

поток, переважна концентрація сконденсованої вологи спостерігається в зоні зменшених швидкостей обтікання. В роботі [6] запропоновано і протестовано метод врахування випадіння вологи, що дозволяє скоректувати результати вимірювань

Середній теплообмін

Рис. 3 ілюструє інтенсивність середньої тепловіддачі циліндра-калориметра в однорядному пучку труб з різним кроком спіральної канавки і при обтіканні повітрям. Обробка первинних дослідних даних виконана відповідно до методики, викладеної в роботі [6]. Зі зменшенням кроку спіралі від 40 мм до 10 мм тепловіддача істотно зростає, особливо в області високих чисел Рейнольдса. При збільшенні числа заходів від 1 до 2 тепловіддача в області більших чисел Рейнольдса знижується.

Як впливає з отриманих даних, двозаходність канавки зменшує асиметрію обтікання циліндру і тому

інтенсивність тепловіддачі знижується. Малий крок канавки (10 мм) не тільки збільшує площу теплообміну, але й збільшує кількість зон інтенсивної турбулізації потоку, які утворюються при виході з канавки. В останньому випадку теплообмін в порівнянні з пучком гладких циліндрів (наприклад, при $Re = 15000$) збільшується на 69%.

Залежності середнього числа Нусельта від числа Рейнольдса представлені в формі ступеневої залежності:

$$Nu = A \cdot Re^n, \quad (1)$$

де A і n – експериментальні константи. Значення коефіцієнту A і показника степеню n характеризуються наступними даними. Для циліндрів з кроком канавки 10 мм: $A = 0,18$ $n = 0,78$; з кроком 40 мм і двома заходами $A = 0,097$ $n = 0,78$; з кроком 40 мм: $A = 0,45$, $n = 0,62$. Таким чином, зі зменшенням кроку в однозаходних

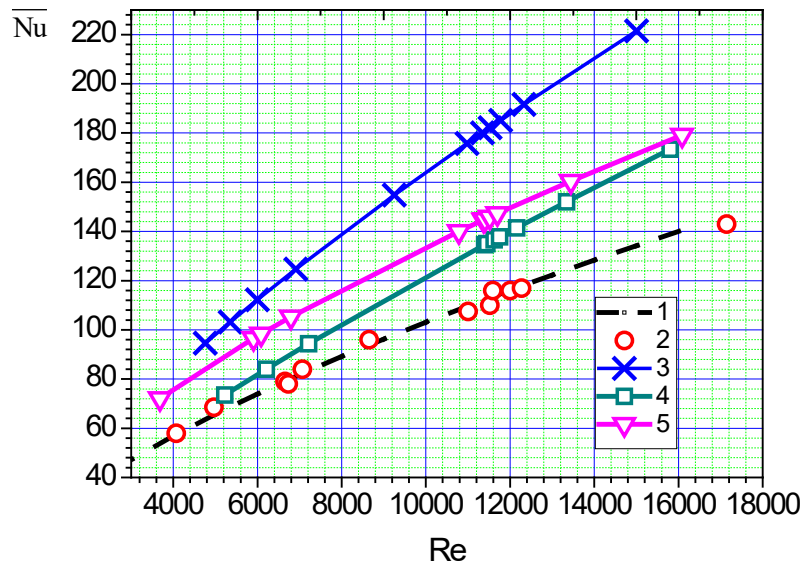


Рис. 3. Залежності середнього числа Нусельта від числа Рейнольдса для однорядного пучка циліндрів з різними кроками канавки 1 – пучок гладких труб [9]; експериментальні дані авторів: 2 – пучок гладких труб; 3 – канавка з кроком 10 мм, один захід; 4 – канавка з кроком 40 мм, два заходи; 5 – канавка з кроком 40 мм, один захід.

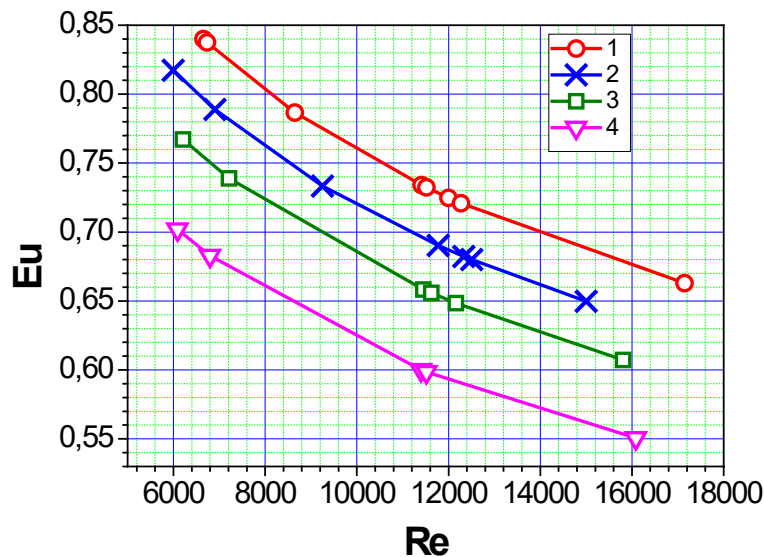


Рис. 4. Залежність числа Ейлера від числа Рейнольдса для однорядного пучка циліндрів з різним кроком канавок, та для пучка гладких циліндрів. Експериментальні дані авторів: 1 – пучок гладких циліндрів; 2 – з канавками з кроком 10 мм, один захід; 3 – з канавками з кроком 40 мм з двома заходами; 4 – з канавками з кроком 40 мм, один захід

канавках показник степеня зростає і наближається до значення, характерного для турбулентної течії.

Гідрравлічні втрати

Гідрравлічний опір визначався по різниці статичних тисків в отворах на боковій стінці робочої дільниці p_1 і p_2 (рис. 1) за допомогою мікроманометра. Рисунок 4

показує гідрравлічний опір однорядних пучків циліндрів з різним кроком спіральної канавки. Різниця між даними Ісаченка [9] і даними авторів для гладких циліндрів не перевищує похибки експерименту. Отже, однорядний пучок циліндрів зі спіральними канавками має опір нижчий, ніж опір однорядного пучка гладких циліндрів.

З ростом кроку спіральної канавки втрати тиску знижуються.

Узагальнення експериментальних даних виконано у формі рівняння подібності:

$$Eu = B \cdot Re^m, \quad (2)$$

де B і m – експериментальні константи. Однією з причин різного нахилу залежностей (2) для різних циліндрів є вплив збільшення площі проходу повітря між циліндрами, пов'язаного з наявністю канавок. Значення коефіцієнту B і показника степеню для гладких циліндрів $B = 7,586$, $m = -0,25$. Для канавки з кроком 10 мм: $B = 7,190$, $m = -0,25$; з кроком 40 мм (2 заходи); $B = 6,809$, $m = -0,25$ і з кроком 40 мм; $B = 6,199$, $m = -0,25$.

Отже, спіральна канавка на зовнішній поверхні циліндра сприяє інтенсифікації зовнішнього теплообміну, однак при цьому втрати тиску знижуються. Мабуть, це обумовлено змінами гідродинамічної структури течії на поверхні циліндру і в його кормовій зоні.

Вихрова структура

Для пояснення отриманих результатів були виконані дослідження вихрової структури в зоні за циліндром з гвинтовою канавкою. Як показав Т. Карман, при обтіканні гладкого циліндра нев'язкою рідиною

утворюється два періодичних ланцюжки вихорів з приведеною частотою сходження (числом Струхалія) $Sh = 0,21(1 - 20/Re)$ [6]. У випадку, коли на зовнішній поверхні циліндра утворена спіральна канавка, умови обтікання правої і лівої половинок циліндру на ділянці величиною одного кроку спіралі суттєво відрізняються. Особливо це стосується області переходу ламінарного потоку в турбулентний [7].

Поперечне траверсування потоку, яке здійснювалось за допомогою рухомої трубки Піто 16 (рис. 1), дозволило оцінити енергію вихорів, які утворювали стежку Кармана. При вимірюваннях були взяті до уваги рекомендації Біркгофа [8], що відстань між траєкторіями центрів вихорів в 1,2 рази більша від діаметра циліндра. П'єзокерамічний сенсор 9 (рис. 1) фіксує удари вихорів, які стикаються з його пластинкою, сигнал сенсора перетворюється в аналогово-цифровому перетворювачі 11 і потім записується в комп'ютері.

На рис. 5 показано приклад такого запису для однорядного пучка гладких циліндрів Sm при $Re = 4965$, де дані представлені в умовних одиницях. Видно наявність 4-х типів вихорів з умовними рівнями величини імпульсів 0,1 0,2 0,3 і 0,4. Застосування циліндрів з канавками збільшує кількість типів вихорів і порушує регулярність їх виникнення. Статистичний аналіз розподілу кількості вихорів за величиною їх імпульсів

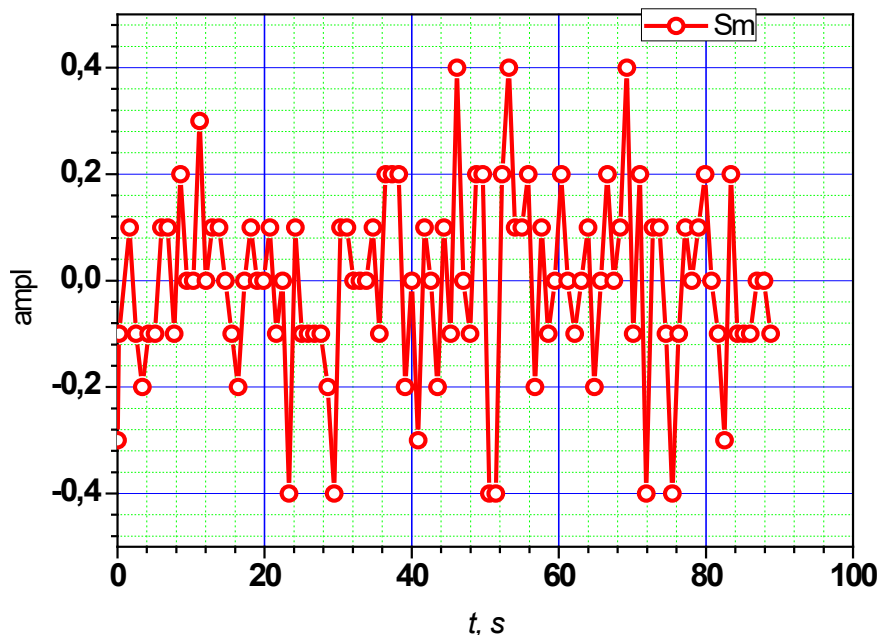


Рис. 5. Амплітуди імпульсів вихорів на виході з робочої ділянки для гладкого циліндра (умовні одиниці) в залежності від часу ($Re=4965$).

наведено на рис. 6 (дані представлені в умовних одиницях). Як видно, канавки з кроками 40 мм і 40 мм (2 заходи) генерують дрібні вихори подібні до тих, що виникають за гладкими циліндрами. В той же час циліндри з канавками з кроком 10 мм показують виникнення додаткових типів вихорів.

Таким чином, можна зробити висновок, що причина різкого зростання тепловіддачі при кроці спіральної канавки 10 мм обумовлено заміною вихрової структури насиченої дрібними вихорами при кроці 40 мм, що характерно і для обтікання гладкого циліндра, до вихорів середнього і великого розміру, число яких удвічі більше. Певну роль відіграє взаємне розташування канавок на сусідніх циліндрах (кутова координата початку канавки відносно лобової точки циліндра.).

Зміна вихрової структури сприяє випереджаючому зростанню теплообміну в порівнянні з супутніми втратами тиску. Наприклад, при $Re = 15000$ відносна зміна середнього теплообміну Nu / Nu_0 становить 1,69, а відносні втрати тиску складають 0,96. В даному випадку фактор аналогії Рейнольдса ($Nu / Nu_0 / Eu / Eu_0$) дорівнює 1,76, що є досить високим показником.

Висновки

Дослідження підтвердили раніше зроблений висновок про те, що заглиблення на теплообмінній поверхні дозволяють інтенсифікувати теплообмін при порівняно невеликих втратах тиску. Ці результати важливі для практичного використання теплообмінних апаратів в області чисел Рейнольдса $2000 < Re < 17000$. Коли на зовнішній поверхні циліндру утворена спіральна канавка, умови обтікання правої і лівої її половин суттєво відрізняються. Внаслідок цієї асиметрії виникає додаткова складова швидкості, яка прискорює перехід з ламінарного обтікання в турбулентне, впливає на сепарацію примежового шару і в результаті відбувається не тільки інтенсифікація тепловіддачі, але й зменшення гідравлічного опору теплообмінної поверхні.

В результаті проведення серії експериментів з трьома типами канавок було зафіксовано додаткове вихроутворення різноманітної природи, яке не тільки збільшило залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості потоку повітря, але й допомогло пояснити зменшення гідравлічного опору і збільшення фактору аналогії Рейнольдса.

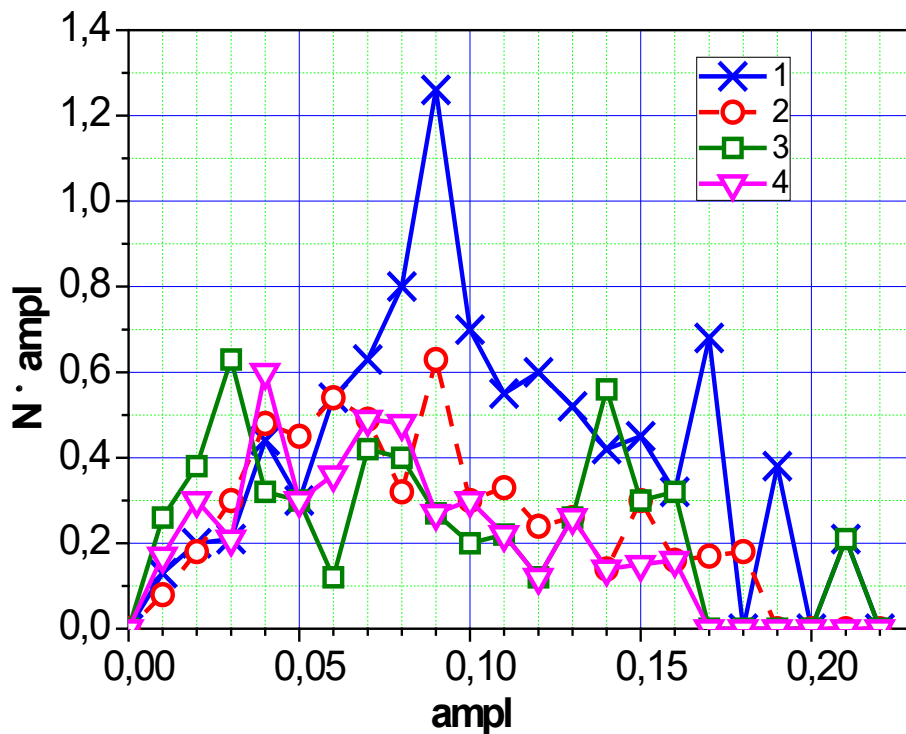


Рис. 6. Спектр розподілу амплітуд імпульсів вихорів(в умовних одиницях) по величині амплітуд для циліндрів з різними типами поверхні. 1 – канавка з кроком 10 мм, один захід; 2 – гладка поверхня; 3 – канавка з кроком 40 мм, 2 заходи; 4 – канавка з кроком 40 мм, один захід ($Re=11600$).

1. В сліді за циліндром з канавками спостерігались регулярні вихори, які були відсутні в сліді за гладким циліндром. Вони додатково турбулізували кормову зону, що забезпечувало інтенсифікацію теплообміну. Додаткова турбулізація потоку виникає в передній області циліндру, де канавка розміщена ще до відриву примежового шару.

2. В залежності від кроку канавки, числа заходів і числа Рейнольдса інтенсифікація теплообміну складає від 1,1 до 1,69 в порівнянні з гладким циліндром. Втрати тиску при цьому знижуються на величину від 1,06 до 1,18 рази.

3. Для розглянутого типу заглиблень фактор аналогії Рейнольдса більше одиниці, що вказує на випереджуючий ріст теплообміну в порівнянні з втратами тиску.

ЛІТЕРАТУРА

1. Спицын В. Е., Боцула А. Л., Чобенко В. Н. Соломонюк Д. Н. Высокоэффективная газотурбинная установка для ГПА// Вестник Национального технического университета «ХПИ». - Харьков: НТУ ХПИ - 2008. - № 35, С. 8-11.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Москва: Наука, 1969. - 744 с.
3. Коваленко Г. В. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление трубчатых поверхностей с цилиндри-

ческими лунками при поперечном обтекании в одно-рядных пучках// Промышленная теплотехника. - 1998.- Т. 20, №3. С. 65-70.

4. Kovalenko G. V., Khalatov A. A. Fluid Flow and Heat Transfer Features at a Cross-Flow of Dimpled Tubes in a Confined Space// GT2002-38155 Proceeding of ASME Turbo Expo 2003 June 16-19 2003, -2003, Atlanta, Georgia, USA.

5. Коваленко Г. В., Мейрис А. Ж. Сравнение различных способов интенсификации теплообмена на цилиндрических поверхностях// Восточно-европейский журнал передовых технологий 2013 г. 3/12 (63) С. 58-60.

6. Халатов А. А., Коваленко Г. В., Мулярчук М. А., Степанюк О. Ю. Дослідження впливу випадання вологи на поверхні циліндра на визначення коефіцієнта тепловіддачі повітря при застосуванні методу танення льоду// Теплофізика та теплоенергетика. - 2019.- Т. 41, №1.- С. 3-8.

7. Karman Th. Uber den Mechanismus des Widerstandes den ein bewegter Korper in einer Flussigkeit erfahrt// Gott. Nachr. (Math. – phis. Kl.) – 1912, – P.547 – 556.

8. Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы и каверны. Москва: МИР, 1964, -466 с.

9. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Москва: Энергия, 1975, - 488 с.

FEATURES OF FLOWING ROUND AND HEAT TRANSFER OF ONE-ROW OF CYLINDERS WITH SPIRAL GROOVES IN INTERACTION WITH A CROSS - FLOW OF AIR

Khalatov A. A.^{1,2}, Kovalenko G. V.¹, Muliarchuk M. A.²

¹*Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabov str, Kyiv, 03680, Ukraine*

²*National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky" "Physical-Technical Institute", 37 Peremogy avenue, Kyiv, 03056, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.2>

The purpose of this work is to determine the hydraulic resistance and the average heat transfer over a single row of cylinders with spiral grooves on the external surface. The research was carried out in the range of Reynolds numbers based on the external diameter of the cylinder from 2.000 to 17.000.

Research tasks. Determination of the average coefficient of heat transfer from the central cylinder in a single row of cylinders with an outer diameter of 22 mm the surface of which is moulded with screw grooves with steps of 10, 20 and 40 mm and the cross-section of the groove is 2.7 mm x 1.5 mm. Relative transverse step of cylinders in the row is 1.7. The research is carried out in a transient mode in the range of Reynolds numbers calculated from the outside diameter of the cylinder from 2.000 to 17.000. Determination of the hydraulic resistance of the beam of the cylinder.

Results. Traversing of the flow by the speed meters showed a significant unevenness of the velocity field. Local maximum were observed at the outlets of the grooves in the narrowest space between the cylinders. Several types of additional regular vortices were recorded that, with their frequency and amplitude, differed from the vortices formed by smooth cylinders. The relative number of small vortices increased with decreasing step of grooves. Turbulization of the flow by a groove caused the asymmetry of the field of velocity near the cylinder, the appearance of the velocity component perpendicular to the main stream and the reduction in the zone of stern vortices behind cylinder. As a result, the static pressure drop across cylinders with grooves was lower than that on a bundle of smooth cylinders. Depending on the size of the step of grooves of 10 mm, 20 mm, 40 mm, the Euler number for different types of cylinders was reduced by 5.9%, 9.9%, 18.3% compared to the smooth cylinder. The intensity of heat transfer with the decrease in the groove step increased from 28% to 65%. The

exponent m at the Reynolds number in the equation

$Eu = A \cdot Re^m$ increased from 0.6 to 0.74 indicating the appearance of at least a part of the heat transfer surface of the turbulent flow regime. The Reynolds analogue factor in the formation of spiral grooves on the surface of cylinders increased not only due to the enhancement of heat transfer, but also due to the reduction in pressure losses.

Key words: row of cylinders, spiral grooves, hydraulic resistance, heat transfer.

References 9, figures 6, table 1.

1. Spitsyn V. E., Botsula A. L., Chobenko V. N. Solomonyuk D. N. [High-efficiency gas turbine installation for GPU] Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta "KPI" [Bulletin of the National Technical University "KPI"]- Kharkov: NTU KPI , 2008, № 35, S. 8-11. (in Rus.)

2. Shlikhting G. [Theory of the boundary layer]. Moscow, Nauka, [Science]: 1969, 744 p. (in Rus.)

3. Kovalenko G. V. [Heat transfer and hydraulic resistance of tubular surfaces with cylindrical cavities with transverse flow in single-row beams]. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 1998, V. 20, № 3. P. 65-70. (in Rus.)

4. Kovalenko G. V., Khalatov A. A. Fluid Flow and Heat Transfer Features at a Cross-Flow of Dimpled Tubes in a Confined Space// GT2002-38155 Proceeding of ASME Turbo Expo 2003 June 16-19 2003, 2003, Atlanta, Georgia, USA.

5. Kovalenko G. V., Meirys A. Zh. [Comparison of various ways to intensify heat transfer on cylindrical surfaces]. Vostochno evropeyskiy zhurnal peredovyh tekhnologiy [East European Journal of Advanced Technologies] 2013, 3/12 (63) P. 58-60. (in Rus.)

6. Khalatov A. A., Kovalenko G. V., Mulyarchuk M. A., Stepanyuk O. Yu [Investigation of the effect of dropping of moisture on the cylinder surface on determining the coefficient of heat transfer in the application of the method of melting of the ice] Teplofizyka ta teploenergetyka [Thermal Physics and Thermal Power Engineering.] - 2019.- T. 41, №1.- S. 3-8. (in Ukr.)

7. Karman Th. Uber den Mechanismus des Widerstandes den ein bewegter Korper in einer Flussigkeit erfahrt// Gott. Nachr. (Math. – phis. Kl.) ,1912, P.547 – 556. [Word]

8. Birkhof G., Sarantonello E. [Jets, tracks and caverns]. Moscow. MIR, 1964, 466 p. (in Rus.)

9. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. [Heat transfer]. Moscow. [Energy], 1975, 488 p. . (in Rus.)

Отримано 02.04.2019

Received 02.04.2019

УДК 538.9:536.6

ТЕПЛОТА КРИСТАЛІЗАЦІЇ ВИСОКОТЕПЛОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІЕТИЛЕНУ ПРИ ЙОГО НАПОВНЕННІ МІКРОЧАСТИНКАМИ МІДІ

Фіалко Н.М.¹, член-кореспондент НАН України, Дінжос Р.В.², докт. техн. наук,
Косєва Н.С.³, канд. хім. наук, Шеренковський Ю.В.¹, канд. техн. наук,
Меранова Н.О.¹, канд. техн. наук, Навродська Р.О.¹, канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Капніст, 2а, м. Київ, 03680, Україна

²Миколаївський національний університет ім. В.О. Сухомлинського, вул. Никольська, 24, м. Миколаїв, 54030, Україна

³Інститут полімерів Болгарської Академії наук, вул. Акад. Г. Бончева, 103а, м. Софія, 1113, Болгарія

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.3>

Наведено результати експериментальних досліджень питомої теплоти кристалізації полімерних композитів на основі поліетилену, наповненого мікрочастинками міді. Представлено дані щодо ефектів впливу на теплоту кристалізації досліджуваних композитів таких факторів, як масова частка наповнювача та швидкість охолодження композитів з розплаву. Подаються результати зіставлення величин питомої теплоти кристалізації полімерних мікрокомпозитів, одержаних на основі методу, що базується на змішуванні компонентів у сухому вигляді та у розплаві полімеру.

Приведены результаты экспериментальных исследований удельной теплоты кристаллизации полимерных композитов на основе полиэтилена, наполненного микрочастицами меди. Представлены данные, касающиеся эффектов воздействия на теплоту кристаллизации исследуемых композитов таких факторов, как массовая доля наполнителя и скорость охлаждения композитов из расплава. Представлены результаты сопоставления величин удельной теплоты кристаллизации полимерных микрокомпозитов, полученных на основе метода, базирующегося на смешении компонентов в сухом виде и в расплаве полимера.

The results of experimental studies of the specific heat of crystallization of polymer composites based on polyethylene filled with copper microparticles are presented. Data concerning the effects on the crystallization heat of the studied composites on such factors as the mass fraction of the filler and the cooling rate of the composites from the melt are presented. The results of the comparison of the values of the specific heat of crystallization of polymer microcomposite, obtained by a method based on the mixing of components in a dry form and in a polymer melt, are presented.

Бібл. 15, табл. 3, рис. 1.

Ключові слова: теплота кристалізації, високотеплопровідні полімерні мікрокомпозити, мікрочастинки міді, екзотерми кристалізації.

$q_{кр}$ – питома теплота кристалізації;
 $Q_{П}$, $Q_{П}^{min}$, $Q_{П}^{max}$ – поточне, мінімальне і максимальне значення питомого теплового потоку;
 T – поточна температура;
 T_N , T_K – температура початку і кінця кристалізації;

T_{max} – температура, що відповідає потоку $Q_{П}^{max}$;
 ΔT – різниця температур T_N та T_K ;
 V_T – швидкість охолодження;
 ω – масова частка наповнювача.

Вступ

Одним із перспективних напрямів застосування полімерних мікрокомпозитів є використання їх високотеплопровідних модифікацій [1-15]. Тенденція до все більш широкого застосування вказаних модифікацій потребує проведення поглиблених досліджень їхніх теплофізичних характеристик. Вивченню даних характеристик присвячено цілий ряд робіт, більшість з яких стосується дослідження величин коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності високотеплопровідних полімерних мікрокомпозитів (див. наприклад, [1, 4, 6, 12]).

До важливих теплофізичних характеристик полі-

мерних мікрокомпозитів відноситься також питома теплота їх кристалізації $q_{кр}$, значення якої береться до уваги при визначенні умов застосування даних матеріалів. Однак, дослідження цієї характеристики для композитів, що розглядаються, є вкрай обмеженими. З огляду на це актуальним є завдання вивчення закономірностей поведінки теплоти кристалізації високотеплопровідних полімерних мікрокомпозитів в залежності від різних визначальних факторів.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета роботи полягає у встановленні на основі експериментальних досліджень залежності від ряду чинників

(масової частки наповнювача, швидкості охолодження з розплаву, методу одержання композитів) питомої теплоти кристалізації композитів на основі поліетилену, наповненого мікрочастинками міді.

Визначення питомої теплоти кристалізації $q_{кр}$ базувалося на використанні експериментально одержаних екзотерм кристалізації композиту при його охолодженні з розплаву з заданою постійною швидкістю V_T (методика побудови вказаних екзотерм наводиться в [15]). Величина $q_{кр}$ визначалась за залежністю

$$q_{кр} = \frac{\int_{T_N}^{T_K} (Q_{II} - Q_{II}^{min}) dT}{V_T} \quad (1)$$

В роботі для одержання досліджуваних полімерних мікрокомпозитів використовувались два методи:

- метод I, що базується на змішуванні полімеру і наповнювача у сухому вигляді;
- метод II, заснований на змішуванні компонентів у розплаві полімеру.

Більш детальний опис застосованих методів наводиться в [8].

Мікрочастинки міді, що використовувались як наповнювач, виготовлялись методом розтирання мідних ошурків у шаровому млині з одержанням частинок розміром (0,5...1,0) мкм.

Табл. 1. Характеристики процесу кристалізації полімерних мікрокомпозитів на основі поліетилену, наповненого мікрочастинками міді, для методу I їх одержання

V_T , К/хв	ω , %	T_N , К	T_{max}	T_K , К	ΔT , К	Q_{II}^{max} Вт/кг
1	0,3	380,9	375,1	370,7	10,2	13,1
	0,8	379,8	374,1	369,2	10,6	12,9
	4,0	379,2	373,7	368,8	10,4	12,8
2	0,3	379,4	373,0	368,1	11,3	9,6
	0,8	378,7	372,1	367,3	11,4	9,3
	4,0	378,2	372,2	367,2	11,0	9,2
5	0,3	376,0	369,3	362,9	13,1	6,2
	0,8	375,5	368,7	361,9	13,6	5,9
	4,0	375,1	368,2	361,7	13,3	5,8
10	0,3	370,3	363,4	356,6	13,7	4,9
	0,8	369,9	363,1	356,3	13,6	4,8
	4,0	369,7	362,8	355,9	13,8	4,7
20	0,3	365,8	358,1	351,1	14,7	2,9
	0,8	365,1	357,4	350,5	14,6	2,8
	4,0	364,8	357,2	350,2	14,6	2,7

Результати досліджень та їх аналіз

На рис.1 і в табл. 1, 2 наведено результати експериментальних досліджень щодо побудови екзотерм кристалізації для композитів, які розглядаються.

Згідно з одержаними даними характер екзотерм кристалізації досліджуваних композитів є в цілому аналогічним для різних швидкостей їх охолодження з розплаву V_T та значень ω . При цьому для фіксованої масової частки наповнювача ω у разі застосування методу I одержання мікрокомпозитів зростання швидкості V_T призводить до:

- зменшення максимуму Q_{II}^{max} та його зміщення в область більш низьких температур;
- зниження температур початку T_N і кінця кристалізації T_K ;
- зростання інтервалу температур кристалізації $\Delta T = T_N - T_K$.

Наприклад, як видно з табл.1, при $\omega = 0,8\%$ величина Q_{II}^{max} зменшується від 12,9 Вт/кг до 2,8 Вт/кг при зростанні швидкості охолодження V_T з 1 К/хв. до 20 К/хв. При цьому температура початку кристалізації падає від 379,8 К до 365,1 К, а температура кінця кристалізації від 369,2 К до 350,0 К. Що ж до інтервалу температур кристалізації, то він зростає з 10,6 К до 14,6 К. Останнє,

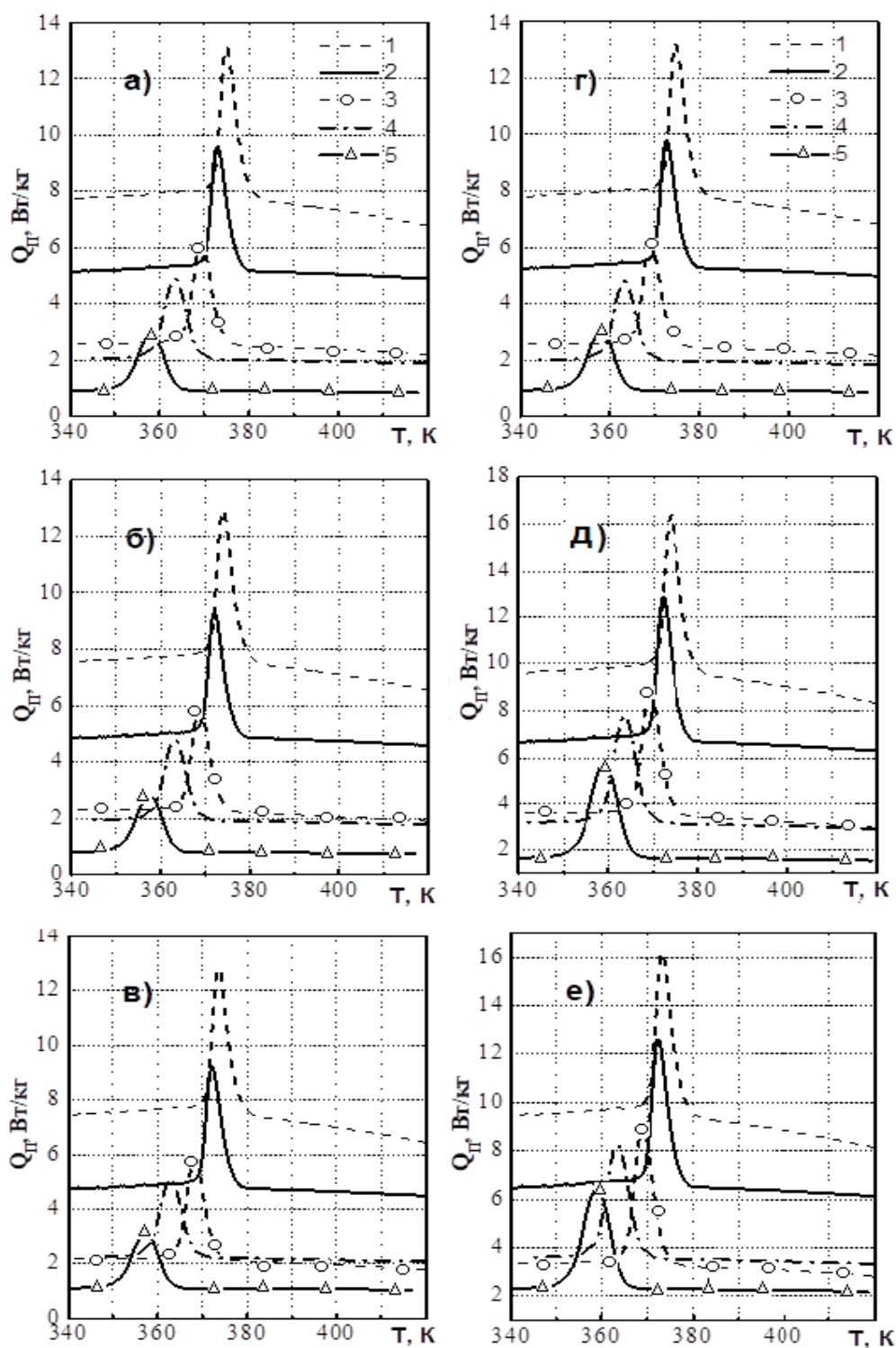


Рис. 1. Екзотерми кристалізації полімерних композитів на основі поліетилену, наповненого мікрочастинками міді, при її масовій частці $\omega = 0,3\%$ (а, г), $0,8\%$ (б, д), 4% (в, е) за умов одержання композитів методом I (а, б, в) та методом II (г, д, е) при різних швидкостях охолодження їх з розплаву: 1 – $V_T = 1$ К/хв.; 2 – $V_T = 2$ К/хв.; 3 – $V_T = 5$ К/хв.; 4 – $V_T = 10$ К/хв.; 5 – $V_T = 20$ К/хв.

як очевидно, зумовлено більш суттєвим зниженням температури T_K ніж T_N при зростанні величини V_T .

При застосуванні методу II для одержання досліджуваних композитів вказані закономірності впливу швидкості V_T на параметри процесу їх кристалізації дещо змінюються. Це стосується, насамперед, характеру зміни величин T_K і ΔT зі збільшенням швидкості V_T для різних значень ω . А саме, для $\omega = 0,3\%$ ефекти впливу швидкості V_T на параметри кристалізації залишаються якісно такими ж, як і для методу I. Для масової частки наповнювача $\omega = 0,8\%$ і $4,0\%$ спостерігається інша картина. Величина T_K зі зростанням V_T змінюється немонотонно, а відтак має місце і немонотонний характер зміни інтервалу температур кристалізації ΔT . Так, для $\omega = 4,0\%$ температура T_K зростає від 367,7 К до 368,1 К при збільшенні швидкості охолодження від 1 К/хв. до 2 К/хв. і знижується при подальшому підвищенні швидкості V_T до 20 К/хв. При цьому інтервал температур кристалізації ΔT падає від 11,3 К до 9,9 К зі зростанням швидкості охолодження V_T від 1 К/хв до 2 К/хв., надалі збільшується до 11,4 К і 11,8 К при $V_T = 5$ К/хв і 10 К/хв і знов знижується до 11,5 К при $V_T = 20$ К/хв.

Щодо закономірностей впливу масової частки наповнювача на характеристики процесу кристалізації композитів, що розглядаються, то вони теж

дещо відрізняються для різних методів одержання композитів. Для методу I зі збільшенням ω для всіх значень V_T зменшуються температури T_N , T_K і T_{max} та тепловий потік Q_{II}^{max} . У випадку застосування методу II має місце більш складний характер впливу ω на параметри процесу кристалізації. Тут ефекти впливу ω суттєво залежать від величини швидкості охолодження V_T . Наприклад, як видно з табл. 2, при $V_T = 1$ К/хв. величина інтервалу кристалізації ΔT становить 10,0 К і 11,4 К відповідно для $\omega = 0,3\%$ і $0,8\%$, тобто зростає зі збільшенням ω . А для $V_T = 20$ К/хв., навпаки, при вказаному збільшенні ω зменшується від 14,6 К до 11,9 К.

Наведені результати досліджень щодо побудови екзотерм кристалізації використовувались для визначення величини $q_{кр}$ для композитів, що розглядаються.

В таблиці 3 представлено величини питомої теплоти кристалізації для досліджуваних полімерних мікрокомпозитів, визначені згідно з залежністю (1). Як свідчать одержані дані, теплота кристалізації композитів, що розглядаються, суттєво залежить від масової частки наповнювача. Значення $q_{кр}$ при інших однакових умовах (фіксованій швидкості охолодження композитів з розплаву V_T та певному методі їх одержання) виявляється тим нижчим, чим більша масова

Табл. 2. Характеристики процесу кристалізації полімерних мікрокомпозитів на основі поліетилену, наповненого мікрочастинками міді, для методу II їх одержання

V_T , К/хв	ω , %	T_N , К	T_{max} , К	T_K , К	ΔT , К	Q_{II}^{max} Вт/кг
1	0,3	380,6	375,6	370,6	10,0	13,2
	0,8	379,6	373,9	368,2	11,4	16,4
	4,0	379,0	373,3	367,7	11,3	16,2
2	0,3	379,1	373,2	368,0	11,1	9,8
	0,8	378,5	372,2	368,3	10,2	12,8
	4,0	378,0	372,4	368,1	9,9	12,6
5	0,3	375,8	369,3	362,5	13,3	6,1
	0,8	375,1	369,2	363,4	11,7	9,1
	4,0	374,7	369,0	363,3	11,4	9,0
10	0,3	370,1	363,1	356,2	13,9	4,8
	0,8	369,5	363,6	357,8	11,7	7,8
	4,0	369,3	363,4	357,5	11,8	7,6
20	0,3	365,7	358,4	351,1	14,6	3,0
	0,8	365,1	359,1	353,2	11,9	5,7
	4,0	364,7	358,9	353,2	11,5	5,6

Табл. 3. Значення теплоти кристалізації $q_{кр}$ (Дж/кг) для полімерних мікрокомполімерів на основі поліетилену, наповненого мікрочастинками міді при різному вмісті наповнювача ω та різних швидкостях V_T охолодження композитів з розплаву для двох методів їх одержання

V_T , К/хв	$\omega = 0 \%$	Метод І			Метод ІІ		
		ω , %			ω , %		
		0,3	0,8	4,0	0,3	0,8	4,0
1	1624	1547	1514	1430	1398	1373	1260
2	782	757	752	684	695	674	620
5	306	302	295	265	287	264	241
10	146	145	144	131	132	126	116
20	73	72	71	63	65	63	56

частка наповнювача ω . Так, зниження величини $q_{кр}$ при збільшенні ω від 0,0 до 4,0% у досліджуваному діапазоні зміни швидкості охолодження композитів V_T становить 13,6 – 15,9 % при застосуванні методу І їх одержання і 26,1 – 30,4% – для методу ІІ.

Виконані дослідження показали, що величини $q_{кр}$ для композитів, які розглядаються, суттєво зменшуються зі зростанням швидкості їх охолодження V_T з розплаву. Як видно з табл. 3, для $\omega = 4,0\%$ з підвищенням швидкості охолодження від 1 К/хв. до 20 К/хв. значення $q_{кр}$ знижується від 1430 Дж/кг до 63 Дж/кг для методу І одержання композитів, тобто приблизно у 22,7 рази, і від 1260 Дж/кг до 56 Дж/кг для методу ІІ, тобто в 22,5 рази. Слід також відзначити, що ефекти впливу швидкості V_T на значення теплоти кристалізації $q_{кр}$ є близькими як у якісному, так і у кількісному відношенні при різних величинах масової частки наповнювача і різних методах одержання полімерних композитів. Так, для масової частки наповнювача 0,3%, 0,8% та 4,0% величини $q_{кр}$ при $V_T = 1$ К/хв. і 10 К/хв. відрізняються у 10,66; 10,51 і 10,91 рази при одержанні композитів за методом І та у 10,59; 10,89 і 10,86 рази при застосуванні методу ІІ.

Щодо впливу власне методу одержання композитів на величину їх питомої теплоти кристалізації, то як свідчать результати досліджень, методу І відповідають більші значення $q_{кр}$. Вказане співвідношення величин $q_{кр}$ має місце в усьому досліджуваному діапазоні зміни масової частки наповнювача та швидкості охолодження композиту з розплаву. При цьому для всіх величин ω абсолютні значення відмінностей питомої теплоти кристалізації композитів, одержаних різними

методами, є тим більшими, чим менші швидкості охолодження V_T . Так, при $\omega = 0,8\%$ значення питомої теплоти кристалізації $q_{кр}$, що відповідають різним методам одержання композитів, відрізняються на 141 Дж/кг при $V_T = 1$ К/хв. і лише на 18 Дж/кг при $V_T = 10$ К/хв.

Висновки

У відносно широкому діапазоні зміни масової частки наповнювача ω та швидкості охолодження з розплаву V_T виконано експериментальні дослідження питомої теплоти кристалізації $q_{кр}$ полімерних мікрокомполімерів на основі поліетилену при його наповненні мікрочастинками міді. При цьому:

1. Проведено аналіз результатів експериментів щодо побудови екзотерм кристалізації досліджуваних мікрокомполімерів та встановлено ефекти впливу на характеристики цих екзотерм ряду визначальних чинників.

2. На основі експериментально одержаних екзотерм кристалізації визначено величини питомої теплоти кристалізації $q_{кр}$ для полімерних композитів, що розглядаються. Показано, що значення $q_{кр}$:

- суттєво зменшуються зі зростанням швидкості їх охолодження V_T з розплаву при різних величинах масової частки наповнювача ω і методах одержання композитів;

- виявляється тим меншим чим більша масова частка наповнювача для фіксованої швидкості охолодження V_T і певного методу одержання композитів;

- для методу їх одержання, що базується на

змішуванні композитів у сухому вигляді, є більшим ніж для методу, заснованому на їх змішуванні в розплаві полімеру для всіх досліджуваних величин масової частки наповнювача ω і швидкості охолодження V_T композитів з розплаву.

ЛІТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Фіалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Теплофизические характеристики высокотеплопроводных полимерных микро- и нанокомпозитов. Промышленная теплотехника. 2015. №5. С.5-15.
2. Фіалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Полимерные микро- и нанокомпозиты как объекты теплофизических исследований для элементов теплоэнергетического оборудования. Промышленная теплотехника. 2017. №2. С.36-45.
3. Fialko N., Dinzhos R., Navrodska R., Prokopov V., Sherenkovsky Ju., Meranova N. Thermalphysical properties of polymer micro- and nanocomposites. International journal for science, technics and innovations for the industry. International scientific journal «Machines. Technologies. Materials». Publisher: Scientific Technical Union of Mechanical Engineering. "Industry 4.0", Sofia, Bulgaria, 2018, Issue 4, p.185-188. ISSN PRINT 1313-0226
4. Фіалко Н. М., Динжос Р.В., Шеренковский Ю. В., Меранова Н. О., Навродська Р.О. Теплопроводность полимерных микро- и нанокомпозитов на основе полиэтилена при различных способах их получения. Промышленная теплотехника. 2017. №4. С. 21-26.
5. Динжос Р.В., Фіалко Н.М., Лисенков Е.А. Аналіз теплопровідності полімерних нанокомпозитів наповнених вуглецевими нанотрубками та технічним вуглецем. Journal Nano and Electronic Physics 2014. V6. N1. 01015 (6pp).
6. Долинский А.А., Фіалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Теплофизические свойства полимерных микро- и нанокомпозитов на основе поликарбоната. Промышленная теплотехника. 2015. №2. С.12-19.
7. Фіалко Н.М., Динжос Р.В., Меранова Н.О., Шеренковский Ю.В., Навродская Р.А. Теплопроводность полимерных микро- и нанокомпозитов на основе поликарбоната при различных методах их получения. Технологические системы. 2018. 1(82). С. 64-69.
8. Долинский А.А., Фіалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Влияние методов получения полимерных микро- и нанокомпозитов на их теплофизические свойства. Промышленная теплотехника. 2015. №4. С.5-12.
9. Динжос Р.В., Лисенков Е.А., Фіалко Н.М., Клепко В.В. Вплив методу введення наповнювача на теплофізичні властивості систем на основі термопластичних полімерів та вуглецевих нанотрубок. Журнал фізики і інженерії поверхності. 2014. т.12. №4. С. 446-453.
10. Динжос Р.В., Фіалко Н.М., Лисенков Е.А. Особливості теплопровідності композитів на основі термопластичних полімерів та частинок алюмінію. Журнал нано- та електронної фізики. 2015. Т. 7. № 3. С. 03022-1 - 03022-5.
11. Фіалко Н.М., Динжос Р.В. Теплофизические основы создания полимерных микро- и нанокомпозитов для элементов энергетического оборудования. Промышленная теплотехника. 2015. №7. С. 172-175.
12. Долинский А.А., Фіалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Температурные зависимости коэффициентов теплопроводности полимерных микро- и нанокомпозитов для теплообменных аппаратов. Промышленная теплотехника. 2016. №1. С.5-14.
13. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Динжос Р.В., Меранова Н.О., Шевчук С.І. Ефективність використання полімерних мікро- і нанокомпозитів для теплообмінних апаратів газо-газового типу. Промышленная теплотехника. 2017. №5. С. 12-18.
14. Долинский А.А., Фіалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Структурообразование полимерных микро- и нанокомпозитов на основе поликарбоната в процессах их кристаллизации. Промышленная теплотехника. 2015. №3. С.5-15.
15. Фіалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Влияние типа полимерной матрицы на теплофизические свойства и структурообразование полимерных нанокомпозитов. Технологические системы. 2016. №3(76). С. 49-60.

CRYSTALLIZATION HEAT OF HIGH HEAT CONDUCTING POLYMER COMPOSITES BASED ON POLYETHYLENE FILLED WITH COPPER MICROPARTICLES

Fialko N.M.¹, Dinzhos R.V.², Koseva N.C.³,
Sherenkovskiy Ju.V.¹, Meranova N.O.¹, Navrodska R.O.¹

¹*Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv, 03680, Ukraine*

²*Nikolaev National University. named after V.O. Sukhomlinskiy, 24, Nikolska str., Mykolaev, 540030, Ukraine*

³*Institute of Polimers of the Bulgarian Academy of Sciences 1113 Sofia, Acad. G. Bonchev str, Bl. 103A, Bulgaria*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.3>

The results of experimental studies of the specific heat of crystallization of polymer composites based on polyethylene filled with copper microparticles are presented. Data concerning the effects on the crystallization heat of the studied composites on such factors as the mass fraction of the filler and the cooling rate of the composites from the melt are presented. The corresponding studies were performed with a change in the mass fraction of the filler from 0.3% to 4.0% and the cooling velocity of the microcomposite from the melt from 1 K/min to 20 K/min. It is shown that the specific heat of crystallization decreases significantly with increasing velocity V_T and the mass fraction of the filler ω . The results of the comparison of the values of the specific heat of crystallization of polymer microcomposite, obtained by a method based on the mixing of components in a dry form and in a polymer melt, are presented. It was established that the first of the indicated methods correspond to large values of the heat of crystallization.

Key words: the heat of crystallization, high-heat conducting polymer microcomposites, copper microparticles, crystallization exotherms.

References 15, tables 3, figures 1.

1. Dolinsky A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodska R.O. [Thermophysical characteristics of high heat conduction polymer micro- and nanocomposites], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2015. No 5. P.5–15. (Rus.)

2. Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodska R.O. [Polymer micro- and nanocomposites as objects of

thermophysical research for elements of heat and power equipment], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2017. No 2. P.36–45. (Rus.)

3. Fialko N., Dinzhos R., Navrodska R., Prokopov V., Sherenkovskiy Ju., Meranova N. Thermalphysical properties of polymer micro- and nanocomposites. *International journal for science, technics and innovations for the industry. International scientific journal «Machines. Technologies. Materials»*. Publisher: Scientific Technical Union of Mechanical Engineering. “Industry 4.0”, Sofia, Bulgaria, 2018, Issue 4, p.185–188. ISSN PRINT 1313-0226

4. Fialko N.M., Dinzhos R.V., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Navrodska R. O. [Heat conductivity of polymer micro and nanocomposites based on polyethylene in different methods of their production]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2017. No 4. P. 21–26. (Rus.)

5. Dinzhos R.V., Fialko N.M., Lisenkov Je.A. [Analysis of the thermal conductivity of polymer nanocomposites filled with carbon nanotubes and technical carbon]. *Zhurnal Nano i Elektronnoi Fiziki* [Journal Nano and Electronic Physics]. 2014. V6. No 1. 01015. 6pp. (Ukr.)

6. Dolinsky A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodska R.O. [Thermophysical properties of polymer micro- and nanocomposites based on polycarbonate]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2015. No 2. P.12–19. (Rus.)

7. Fialko N.M., Dinzhos R.V., Meranova N.O., Sherenkovskiy Ju.V., Navrodska R. O. [Heat conductivity of polymer micro- and nanocomposites based on polycarbonate with different methods of their obtaining]. *Technologicheskie sistemy* [Technological Systems]. 2018. No1(82). P. 64–69. (Rus.)

8. Dolinsky A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodska R.O. [Influence of manufacturing methods polymer micro and nanocomposites on their thermophysical properties], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2015. No 4. P.5–12. (Rus.)

9. Dinzhos R.V., Lisenkov Je.A., Fialko N.M., Klepko V.V. [Influence of the method of entering the filler on the thermophysical properties of systems based on thermoplastic polymers and carbon nanotubes], *Zhurnal Fiziki i Inzhenerii poverkhnosti* [Journal of Surface Physics and Engineering]. 2014. V.12. No 4. P. 446–453. (Ukr.)

10. Dinzhos R.V., Lisenkov Je.A., Fialko N.M., [Features of heat conductivity of composites on the basis of thermoplastic polymers and aluminum particles], *Zhurnal nano- ta elektronnoyi fizyky* [Journal of Nano- and Electronic Physics]. 2015. V. 7. No 3. P. 03022-1 - 03022-5. (Ukr.)

11. Fialko N.M., Dinzhos R.V. [Thermophysical bases for the creation of polymer micro- and nanocomposites

for energy equipment elements], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2015. No 7. P.172–175. (Rus.)

12. *Dolinsky A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodska R.O.* [Temperature dependences of the heat conductivity coefficients of polymer micro and nanocomposites for heat exchange apparatuses], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2016. No 1. P.5–14. (Rus.)

13. *Fialko N.M., Navrodska R.O., Dinzhos R.V., Meranova N.O., Shevchuk S.I.* [Efficiency of using polymer micro- and nanocomposites for heat exchangers of gas-gas type], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2017. No 5. P. 12–18. (Ukr.)

14. *Dolinsky A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodska R.O.* [Structure formation of polycarbonate polymer micro and nanocomposites in their crystallization processes.], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2015. No 3. P.5–15. (Rus.)

15. *Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodska R.O.* [Influence of the type of the polymer matrix on the thermophysical properties and the structuring of polymer nanocomposites.], *Tekhnologicheskiye sistemy* [Technological Systems]. 2016. No3(76). P. 64–69. (Rus.)

Отримано 17.05.2019

Received 17.05.2019

УДК 536.242

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ НА ВХОДЕ В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИЙ КАНАЛ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Ковецкая М.М., канд. техн. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова 2а, Киев, 03680, Украина

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2019.4>

Приведено результати дослідження впливу температури теплоносія на вході в обігрівач мий канал на стійкість природної конвекції в замкнутому циркуляційному контурі

Представлены результаты исследования влияния температуры теплоносителя на входе в обогреваемый канал на устойчивость естественной конвекции в замкнутом циркуляционном контуре.

The results of the study for influencing coolant temperature at entrance to heated channel on the stability of natural convection in a closed circulation loop are presented.

Библ. 20, рис. 3.

Ключевые слова: естественная конвекция, устойчивость двухфазного потока.

C_p – теплоемкость;
 D – диаметр;
 G – расход;
 Π – периметр канала;
 g – ускорение свободного падения;
 i – энтальпия;
 p – давление;
 q – плотность теплового потока;
 r – теплота парообразования;
 S – площадь проходного сечения;
 T, t – температура;
 w – скорость;
 z – продольная координата;
 ρ – плотность;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 μ – коэффициент молекулярной вязкости;

ν – коэффициент кинематической вязкости;
 Φ – истинное объемное паросодержание;
 x – массовое расходное паросодержание;
 θ – угол отклонения от вертикали;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения;
 ξ – коэффициент гидравлического сопротивления;
 τ – время;
 Fr – критерий Фруда;
 Re – критерий Рейнольдса.

Индексы нижние:

s – насыщение;
 w – стенка;
 vx, v_{yx} – вход, выход;
 $нк$ – начало кипения;
 1 – вода;
 2 – пар.

Исследования условий возникновения неустойчивости двухфазного и однофазного потоков теплоносителя в элементах энергетического оборудования не прекращаются с середины прошлого столетия. Особенно интенсивно проводятся исследования устойчивости потока теплоносителя в циркуляционных контурах ядерных энергетических установок, так как возникновение термогидравлической неустойчивости может привести к ухудшению надежности реакторного оборудования. Механизмы неустойчивости двухфазных потоков в элементах энергетического оборудования хорошо изучены и писаны в литературе [1-4]. Однако интерес к исследованиям устойчивости потока теплоносителя не ослабевает в связи с усовершенствованием конструкций энергетического оборудования, появлением теплоносителей с новыми эффективными теплопередающими свойствами. Для интенсификации теплообмена в теплонапря-

женных каналах используются пористые покрытия, что приводит к необходимости исследования устойчивости течения в пористых каналах [5-7], условий возникновения термокапиллярной неустойчивости [8]. Использование наножидкостей с эффективными теплопередающими свойствами для охлаждения высокотемпературных поверхностей потребовало изучения устойчивости течений таких теплоносителей в каналах различной геометрии [9-11].

При разработке ядерных реакторов четвертого поколения особое внимание уделяется пассивным системам безопасности, основанным на принципе естественной циркуляции теплоносителя. Некоторые проекты ядерных реакторов малой и средней мощности интегральной компоновки предусматривают режим работы с естественной циркуляцией теплоносителя в первом контуре. Низкий движущий напор, характерный для

систем с естественной циркуляцией теплоносителя требует проведения анализа термогидравлической неустойчивости в каналах и контурах таких реакторных установок [12]. Исследования нестационарных процессов и устойчивости двухфазных потоков занимают значительное место при обосновании безопасности ЯЭУ, включая анализ аварийных режимов. При полном обесточивании АЭС охлаждение активной зоны водоохлаждаемых реакторов в режиме остаточного тепловыделения должно надежно обеспечиваться естественной циркуляцией теплоносителя.

Наиболее общим видом неустойчивости, встречающихся в двухфазных системах, является колебания волн плотности (неустойчивость плотностных волн). Она обусловлена многочисленными обратными связями между расходом теплоносителя, скоростью генерации пара и перепадом давления в кипящем канале.

В контурах с естественной циркуляцией наблюдается комплексное влияние параметров теплоносителя на устойчивость течения, когда изменение одного из параметров может приводить к изменению других параметров противоположным образом влияющих на устойчивость. Так при увеличении плотности теплового потока, несмотря на увеличение расхода теплоносителя, увеличивается область выходных параосодержаний, где наблюдается теплогидравлическая неустойчивость. Неоднозначно влияние недогрева теплоносителя на входе в парогенерирующий канал на границу устойчивости: увеличение недогрева при его низких значениях дестабилизирует течение, а при высоких значениях стабилизирует [4].

В работе рассмотрено влияние температуры теплоносителя на устойчивость течения в замкнутом контуре теплогидравлического стенда ИТТФ НАНУ в режиме естественной циркуляции. Контур включает подъемный участок с обогреваемой и необогреваемой зоной, конденсатор и опускной участок, где течет однофазный теплоноситель [13]. На вход в электрообогреваемый канал подается вода недогретая до температуры насыщения и подогревается до температуры начала кипения. Далее пароводяная смесь проходит необогреваемый (тяговый) участок, поступает в конденсатор и через опускной канал однофазный теплоноситель возвращается на вход в обогреваемый канал. Рассматривается режим, когда плотность теплового потока на стенке обогреваемого канала остается постоянной, а температура теплоносителя на входе увеличивается.

Основная система уравнений

Для описания тепломассообменных процессов в области двухфазного течения теплоносителя исполь-

зуем одномерную нестационарную частично неравновесную математическую модель, которая показала удовлетворительные результаты при исследовании кризиса теплообмена в нестационарных режимах [14]. Математическая модель включает систему уравнений сохранения массы, импульса и энергии для средних по сечению канала параметров двухфазного потока в виде

$$\frac{\partial(\rho_1(1-\varphi)+\rho_2\varphi)}{\partial\tau} + \frac{1}{S} \frac{\partial G}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial G}{\partial\tau} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G^2}{\rho_x S} \right) = -S \frac{dp}{dz} - \tau_w \Pi - [\rho_1(1-\varphi) + \rho_2\varphi] g S \cos \theta, \quad (2)$$

$$\rho_\varphi \frac{\partial \tilde{a}}{\partial\tau} + \frac{1}{S} \frac{\partial(Gi)}{\partial z} = q_w - \frac{G}{S} g \cos \theta, \quad (3)$$

$$\rho_i = f_i(i_i, p); \quad i=1,2,$$

где $G = G_1 + G_2$, $G_1 = S(1-x)\rho_1 w_1$, $G_2 = Sx\rho_2 w_2$,

$$x = G_2/G, \quad \rho = \rho_1(1-\varphi) + \rho_2\varphi, \quad \tau_w = \frac{\xi G^2}{8S^2 \rho_x},$$

$$\frac{1}{\rho_x} = \frac{(1-x)^2}{\rho_1(1-\varphi)} + \frac{x^2}{\rho_{2s}}, \quad \rho_\varphi = \frac{\partial}{\partial i} [\rho_1(1-\varphi)i_1 + \rho_2\varphi i_2].$$

В рассматриваемых режимах плотность теплового потока на стенке обогреваемого канала значительно меньше критического значения поэтому можно считать, что пар находится в равновесном состоянии: $i_2 = i_{2s}$; $\rho_2 = \rho_{2s}$ – параметры пара на линии насыщения. На обогреваемой части контура в качестве граничного условия задается постоянная плотность теплового потока на стенке, в необогреваемой части используется условие постоянства температуры стенки.

Для решения системы уравнений (1)-(3) задаются замыкающие соотношения, описывающие процессы теплового и механического взаимодействия фаз на

межфазной границе и со стенкой канала. Наибольшее влияние на адекватность расчетов нестационарных режимов двухфазного теплоносителя оказывает точность задания границы начала кипения. В рассматриваемой модели граница $z_{\text{HK}}(\tau, t_{\text{HK}})$ начала кипения определяется как сечение канала, в котором температура теплоносителя достигает температуры t_{HK} начала поверхностного кипения, которая определяется по формуле [15]

$$t_{\text{HK}} = t_s - \eta \frac{\alpha [t_w(t_s) - t_s] \rho S}{G}, \quad \eta = (14 + p) 10^{-6}. \quad (4)$$

Здесь $t_w(t_s)$ – температура стенки в сечении канала, в котором температура теплоносителя достигает температуры насыщения; η – параметр, характеризующий влияние давления.

Замыкающие соотношения, характеризующие тепловое и механическое взаимодействие фаз на межфазной границе и со стенками канала, подробно описаны в работе [16]. Тепловое взаимодействие фаз со стенкой определяется в зависимости от режима течения и теплообмена через коэффициенты теплоотдачи. Для двухфазного режима течения используется формула

$$\alpha_w = \alpha_{\text{mic}} S \min \left[1, \frac{T_w - T_s}{T_w - T_l} \right] + \alpha_{\text{mac}} F, \quad (5)$$

где α_{mic} , α_{mac} – коэффициенты теплоотдачи при микроконвекции и макроконвекции, S – функция подавления кипения, F – функция интенсификации конвективного теплообмена

$$\alpha_{\text{mic}} = 0.00122 \frac{\lambda_1^{0.79} C p_1^{0.45} \rho_1^{0.49} (T_w - T_s)^{0.24}}{\sigma^{0.5} \mu_1^{0.29} r^{0.24} \rho_2^{0.24}} (p_s - p)^{0.75},$$

$$\alpha_{\text{mac}} = 0.023 \left[\frac{\rho_1 |w_1| (1 - \varphi) D}{\mu_1} \right]^{0.8} \left(\frac{C p_1 \mu_1}{\lambda_1} \right)^{0.4} \frac{\lambda_1}{D},$$

$$S = \begin{cases} 1 / (1 + 0.12 \text{Re}_m^{1.14}), & \text{Re}_m < 32.5 \\ 1 / (1 + 0.42 \text{Re}_m^{0.78}), & 32.5 < \text{Re}_m < 70 \end{cases}$$

$$F = \begin{cases} 1, & X_u^{-1} < 0.1 \\ 2.35 (X_u^{-1} + 0.213)^{0.736}, & 0.1 < X_u^{-1} < 100 \end{cases}$$

$$\text{Re}_m = 10^{-4} \frac{\rho_1 |w_1| (1 - \varphi) D F^{1.25}}{\mu_1}$$

$$X_u^{-1} = \left(\frac{x}{1 - x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{0.1}.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления на участках контура $\xi_{\text{тр}}$ определяется по известным формулам в зависимости от режима течения теплоносителя и наличия местных сопротивлений [17]. Коэффициент трения двухфазного потока в каналах определяется через коэффициент трения однофазного потока ξ_{w1} с поправкой на двухфазность по следующей зависимости

$$\xi_w = \xi_{w1} \frac{\rho}{\rho_0} \Phi^2 \quad (6)$$

$$\Phi^2 = \begin{cases} 1.73(1 - x)^2 / (1 - \varphi)^{1.64}, & 0 < 1 - \varphi \leq 0.1 \\ 0.478(1 - x)^2 / (1 - \varphi)^{2.2}, & 0.1 < 1 - \varphi \leq 0.39 \\ (1 - x) / (1 - \varphi)^{1.42}, & 0.39 < 1 - \varphi < 1 \\ 1, & \varphi = 0 \end{cases}.$$

В большинстве математических моделей истинное объемное паросодержание φ определяется через коэффициент скольжения фаз либо используется уравнение генерации пара, которое можно получить, например, из уравнения энергии для смеси [16]. Определение среднего по сечению канала истинного объемного паросодержания по формуле

$$\varphi = \left[1 + K_w \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

требует задания зависимости для коэффициента скольжения фаз $K_w = w_2 / w_1$, являющегося отношением скорости пара к скорости жидкости. В расчетных методиках в основном используется формула Осмачкина В.С. [18], описывающая коэффициент скольжения в трубе и полученная в стационарных условиях

$$K_w = 1 + \frac{0.6 + 1.5 \beta^2}{\sqrt[4]{Fr}} \left(1 - \frac{p}{p_{\text{кр}}} \right), \quad (8)$$

где

$$\beta = \left[1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) \right]^{-1},$$

$Fr = w_0^2 / (gD)$ – критерий Фруда.

Система уравнений (1)-(3) совместно с граничными условиями и замыкающими соотношениями (4)-(8) решается численно методом Эйлера с автоматическим выбором шага по времени согласно условию Куранта [19].

Результаты расчетов

На рис. 1-3 представлено изменение во времени недогрева теплоносителя на входе в обогреваемый канал, расходов теплоносителя на входе и выходе при давлении в контуре 4 МПа, плотности теплового потока на стенке обогреваемого канала 0,3 МВт/м². Из рисунков видно, что режим неустойчивости начинается при недогреве теплоносителя до температуры насыщения на входе в обогреваемый канал 13К и заканчивается при недогреве 5К. Колебания расхода теплоносителя характеризуются регулярной формой и противофазным изменением расхода на выходе относительно расхода на входе в обогреваемый

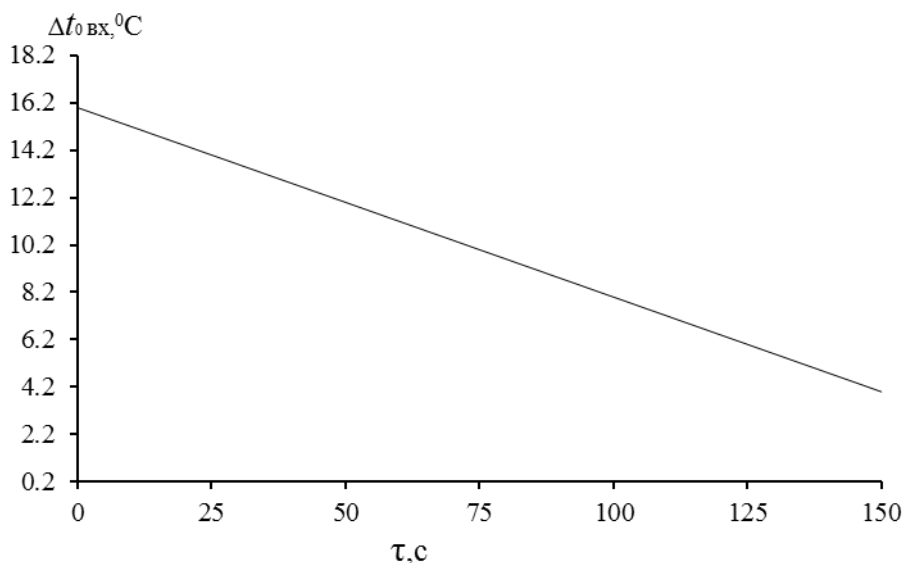


Рис.1. Изменение во времени недогрева теплоносителя на входе в обогреваемый канал.

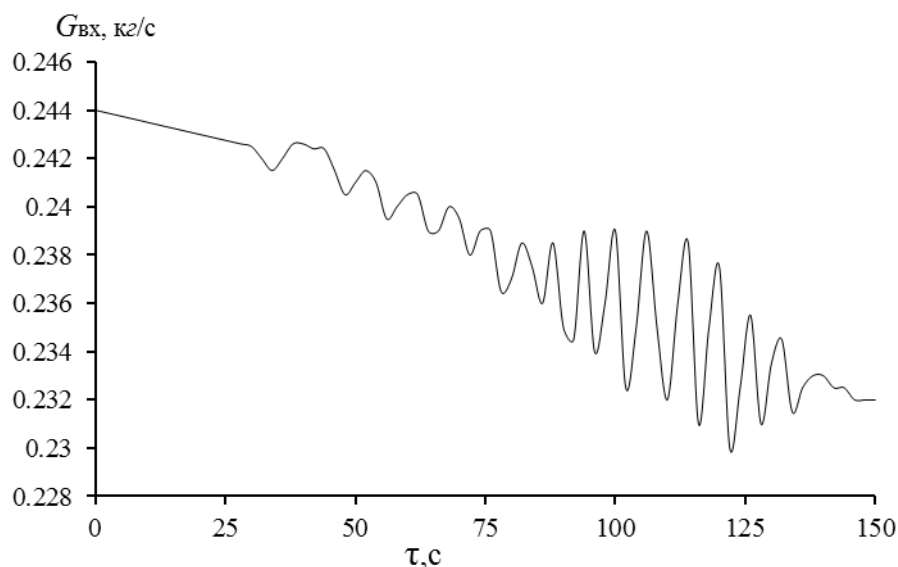


Рис.2. Изменение во времени расхода теплоносителя на входе в обогреваемый канал.

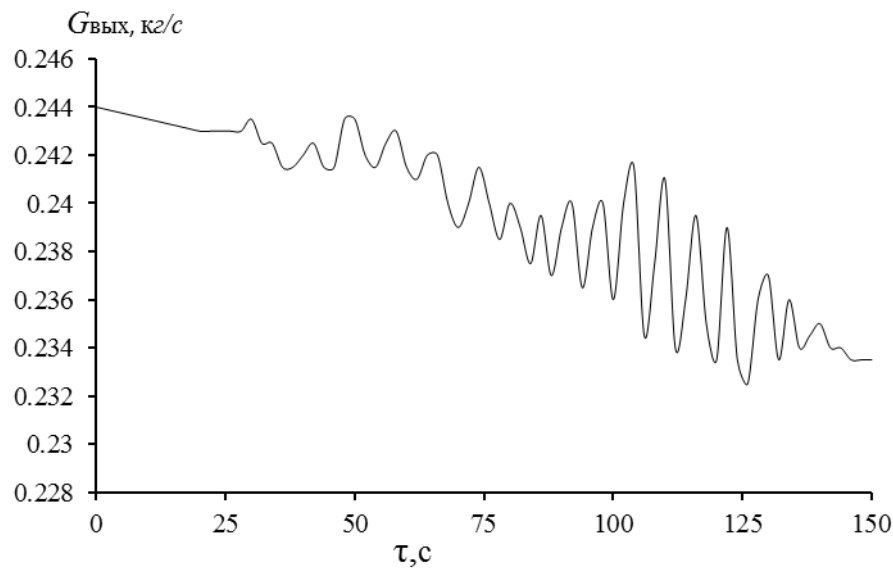


Рис.3. Изменение во времени расхода теплоносителя на выходе из обогреваемого канала.

канал. Период колебаний расходов имеет порядок времени транспорта теплоносителя через обогреваемый канал и составляет 6 с. Процесс характеризуется относительно медленной нестационарностью. Полученные результаты качественно согласуются с данными работы [20].

При малых недогревах теплоносителя на входе его увеличение приводит с одной стороны к уменьшению испарительной зоны в обогреваемом канале, что повышает устойчивость системы, с другой стороны граница начала кипения сдвигается к выходу из обогреваемого канала, что приводит к дестабилизации потока из-за увеличения амплитуды колебаний расхода на выходе. При некотором значении недогрева теплоносителя влияние дестабилизирующего и стабилизирующего факторов компенсируется. При таком значении недогрева наблюдается минимальная устойчивость системы. При дальнейшем увеличении недогрева начинает преобладать влияние стабилизирующего фактора и устойчивость потока увеличивается. В вертикальных обогреваемых каналах минимальная устойчивость двухфазного потока наблюдается при недогреве теплоносителя на входе 10...40 К [4]. Для рассматриваемых условий минимальная устойчивость течения достигается при значении недогрева теплоносителя на входе 13 К.

Выводы

Рассмотрено влияние недогрева теплоносителя на входе в обогреваемый канал на устойчивость двухфазного потока в замкнутом циркуляционном контуре. На основании одномерной нестационарной частично неравновесной математической модели течения двух-

фазного теплоносителя определена граница области неустойчивости естественной циркуляции в зависимости от недогрева теплоносителя на входе в обогреваемый канал.

Показано неоднозначное влияние недогрева теплоносителя на входе в парогенерирующий канал на границу устойчивости двухфазного потока: при малых значениях недогрева его увеличение дестабилизирует течение, при больших недогревах его увеличение стабилизирует течение.

Робота виконана за фінансової підтримки Цільової програми наукових досліджень Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України «Фундаментальні дослідження процесів перетворення та використання енергії» 2018-2019 р., проект 1.7.1.886 «Термогідравлічна нестійкість потоків теплоносіїв та розробка теплофізичних механізмів подолання її руйнівного впливу на елементи енергетичного обладнання».

ЛИТЕРАТУРА

1. Тонг Л. Теплоотдача при кипении и двухфазное течение. – М.: Мир. – 1969. – 344 с.
2. Морозов И.И., Герлига В.А. Устойчивость кипящих аппаратов. – М.: Атомиздат. – 1969. – 280 с.
3. Митенков Ф.М., Моторов Б.И. Механизмы неустойчивости процессов в тепловой и ядерной энергетике. – М.: Энергоиздат. – 1983. – 96 с.
4. Хабенский В.А., Герлига В.А. Нестабильность потока теплоносителя в элементах энергооборудования. – СПб.: Наука. – 1994. – 288 с.

5. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Basok B.I., Blinov D.G. Investigation of stability of a laminar flow in a parallel-plate channel filled with a fluid saturated porous medium // *Phys. Fluids*. – 2005. – 17. – P. 094102-1 - 094102-6.
6. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Nield D.A. Instability of slip-flow in a channel occupied by a hyper-porous medium // *Journal of Porous Media*. – 2007. – vol. 10. – P. 435 - 442.
7. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Flow instability in a curved porous channel formed by two concentric cylindrical surfaces // *Transport in Porous Media*. – 2007. – vol. 69. – P. 373 - 381.
8. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Harmand S., Tyrinov A. I. Thermocapillary instability in an evaporating two-dimensional thin layer film // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – 91. – P. 77 – 88.
9. Avramenko A. A., Tyrinov A. I., Shevchuk I. V., Dmitrenko N. P. Dean instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity // *Phys. Fluids*. – 2016. – 28. – P. 034104-1 - 034104-16.
10. Avramenko A. A., Tyrinov A. I., Shevchuk I. V., Dmitrenko N. P. Centrifugal instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity between co-axial rotating cylinders // *European Journal of Mechanics B/Fluids*. – 2016. – 60. – P. 90– 98.
11. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Moskalenko A. A., Lohvynenko P. N., Kovetska Yu. Yu. Instability of a vapor layer on a vertical surface at presence of nanoparticles // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – 139. – P. 87 – 98.
12. Корниенко Ю.Н. Особенности поведения границ неустойчивости волн плотности в параллельных каналах с подъемными участками в условиях низких массовых скоростей// *Тепловые процессы в технике*. – 2014. – Т. 6, №5. – С.194–201.
13. Антипов В.Г. Экспериментальное определение границ области неравновесного кипения в парогенерирующем канале.// *Промышленная теплотехника*. – 2011. – Т. 33, №5. – С.13–19
14. Ковецкая М.М., Кризис теплообмена в парогенерирующих каналах в нестационарных режимах с увеличением мощности// *Промышленная теплотехника*. – 2011. – Т. 33, №3. – С.60–64
15. Делае Дж., Гуо М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика в атомной и тепловой энергетике. – М.: Энергоиздат, 1984. – 424 с.
16. Кузнецов Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 296 с.
17. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. М.: Энергоатомиздат. –1987. – 376 с.
18. Осмачкин В.С., Лысцова Н.И. О расчете критических тепловых нагрузок в пучках стержней. Препринт ИАЭ-2204. – М.: 1972. – 24 с
19. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир. –1980. –616 с.
20. Хабенский В.Б., Балдина О.М., Калинин Р.И. Механизм пульсаций и влияние конструктивных и режимных параметров на границу устойчивости потока. Достижения в области исследования теплообмена и гидродинамики двухфазных потоков в элементах энергооборудования. – Л.: Наука. –1973. –С.48–66

EFFECT OF WATER TEMPERATURE AT INLET TO THE STEAM GENERATING CHANNEL ON STABILITY OF THE TWO-PHASE FLOW

Kovetskaya M.M.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova 2a, Kiev, 03680, Ukraine.

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.4>

The paper considers the influence of the coolant temperature on stability of the flow in the closed loop of thermal-hydraulic test bench in the natural circulation mode. The loop includes a lifting section with a heated and unheated zone, condenser and lowering section where the single-phase coolant flows. The regime is considered, when the heat flow on the wall of the heated channel remains constant and the temperature of the coolant inlet increases.

The effect of underheating at entrance to heated channel on the stability of the natural circulation of the coolant is considered. A one dimensional unsteady mathematical model of a two-phase coolant flow is presented. Boundaries of natural circulation instability region are determined depending on the coolant underheating at the entrance to the heated channel. Fluctuations in coolant flow rate are characterized by regular shape and an antiphase change in the flow rate at the outlet.

The ambiguous effect of underheating of the coolant at the entrance to the steam generating channel on the boundary of the stability of a two-phase flow is shown: at low values of underheating, its increasing destabilizes flow; at large underheating its increasing stabilizes the flow.

Key words: natural convection, two-phase flow stability.

References 20, figures 3.

1. Tong L.[Heat transfer at boiling and two-phase flow], Moskva, Mir [Mir], 1969. 344p. (Rus)
2. Morozov I.I., Gerliga V.A.[Stability boiling apparatus], Moskva, Atomizdat, [Atomizdat], 1969. 280p. (Rus)
3. Mitenkov F.M., Motorov B.I.[Mechanisms of instability of processes in thermal and nuclear power engineering], Moskva, Energoizdat, [Energoizdat], 1983. 96p. (Rus)
4. Habenskij V.A., Gerliga V.A.[The instability of the flow of coolant in the elements of power engineering], SPb.: Nauka, [Nauka], 1994. 288p. (Rus)
5. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Basok B.I., Blinov D.G. Investigation of stability of a laminar flow in a parallel-plate channel filled with a fluid saturated porous medium. *Phys. Fluids*. 2005. V.17. - P. 094102-1 - 094102-6.

6. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Nield D.A. Instability of slip-flow in a channel occupied by a hyper-porous medium. *Journal of Porous Media*. 2007. V.10. P. 435 - 442.
7. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V. Flow instability in a curved porous channel formed by two concentric cylindrical surfaces. *Transport in Porous Media*. 2007. V. 69.P. 373 - 381.
8. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Harmand S., Tyrinov A. I. Thermocapillary instability in an evaporating two-dimensional thin layer film. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. V.91. P. 77 – 88.
9. Avramenko A. A., Tyrinov A. I., Shevchuk I. V., Dmitrenko N. P. Dean instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity. *Phys. Fluids*. 2016. V.28. P. 034104-1 - 034104-16.
10. Avramenko A. A., Tyrinov A. I., Shevchuk I. V., Dmitrenko N. P. Centrifugal instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity between co-axial rotating cylinders. *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 2016. V.60. P. 90– 98.
11. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Moskalenko A. A., Lohvynenko P. N., Kovetska Yu. Yu. Instability of a vapor layer on a vertical surface at presence of nanoparticles. *Applied Thermal Engineering*. 2018. V.139. P. 87 – 98.
12. Kornienko Yu.N.[Features of the behavior of the density wave instability boundaries in parallel channels with lifting sections under conditions of low mass velocities], *Teplovye processy v tekhnike [Thermal processes in technology]*, 2014. V.6. №5. P. 194–201. (Rus.)
13. Antipov V.G.[Experimental determination of the boundaries of the non-equilibrium boiling region in the steam generating channel], *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*, 20011. V. 33. № 5. P. 13–19. (Rus.)
14. Kovetskaya M.M.[The crisis of heat transfer in the steam generating channels in non-stationary modes with increasing power], *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*, 20011. V. 33. № 3. P. 60–64. (Rus.)
15. Delaje Dzh., Gio M., Ritmyuller M.[Heat transfer and hydrodynamics in nuclear and thermal power engineering], Moskva, Energoizdat, [Energoizdat], 1984. 424p. (Rus)
16. Kuznecov Yu.N.[Heat transfer in the problem of safety of nuclear reactors], Moskva, Energoatomizdat, [Energoatomizdat], 1989. 296p. (Rus)
17. Kirillov P.L., YUr'ev YU.S., Bobkov V.P. [Handbook of Thermo-Hydraulic Calculations], Moskva, Energoatomizdat, [Energoatomizdat], 1987. 376p. (Rus)
18. Osmachkin V.S., Lyscova N.I.[About the calculation of the critical thermal loads in the beam rods], Moskva,

Preprint IAEH-2204,[Preprint IAEH-2204], 1972.24p. (Rus)

19. *Rouch P.* [Computational Fluid Dynamics], Moskva, Mir [Mir], 1980. 616p. (Rus)

20. *Habenskij V.B., Baldina O.M., Kalinin R.I.* [The mechanism of pulsations and the influence of design

and operating parameters on the stability boundary of the flow. Achievements in the study of heat transfer and hydrodynamics of two-phase flows in the elements of power equipment], Leningrad, Nauka [Nauka], 1973. 48–66p. (Rus)

Отримано 31.01.2019

Received 31.01.2019

УДК 621.36; 66.096.5

РОЗРОБКА ТА ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ РЕАКТОРУ З ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМ ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ

Сімейко К.В., канд. техн. наук

Інститут газу НАН України, вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.5>

Приведено розроблену математичну модель теплового балансу та термічного коефіцієнту корисної дії для найбільш поширеного типу реактору з електротермічним псевдозрідженим шаром. Оцінку адекватності математичної моделі проведено на прикладі експериментальних досліджень процесу піролізу метану в реакторі з електротермічним псевдозрідженим шаром.

Приведена разработанная математическая модель теплового баланса и термического коэффициента полезного действия для наиболее распространенного типа реактора с электротермическим псевдооживленным слоем. Оценка адекватности математической модели проведена на примере экспериментальных исследований процесса пиролиза метана в реакторе с электротермическим псевдооживленным слоем.

Mathematical model developed for heat balance and coefficient of thermal efficiency for most common type of electrothermal fluidized bed reactor is described. Verification of appropriateness for mathematical model is provided through the example of experimental research of methane pyrolysis process in electrothermal fluidized bed reactor.

Бібл. 10, рис. 1.

Ключові слова: електротермічний псевдозріджений шар, тепловий баланс, математичне моделювання.

C – теплоємність, ккал/(кг·К);

F – площа поверхні, м²;

G – витрати, м³/год;

ΔH_{298} – теплота утворення, ккал/кг;

L – товщина, м;

P – швидкість завантаження (вивантаження) кг/год;

Q – теплота, кВт;

T – температура, К;

η – коефіцієнт корисної дії, %;

λ – теплопровідність, ккал/(м·год·К);

ρ – густина, кг/м³;

Експ. – експериментальні значення;

ЕТПШ – електротермічний псевдозріджений шар;

Розр. – розрахункові значення;

ККД – коефіцієнт корисної дії, %;

ТФПШ – тверда фаза псевдозрідженого шару.

Вступ. Для ряду високотемпературних процесів внаслідок їх технологічних особливостей неможливе або економічно недоцільне підведення тепла за рахунок спалювання органічного палива. До таких процесів слід віднести, наприклад, одержання водню піролізом вуглеводневих газів, одержання карбідів кремнію та інших карбідів, одержання штучного графіту і термічне очищення природного графіту, високотемпературне нагрівання газів і газових сумішей. Зазначені процеси можуть здійснюватися в діапазоні температур 600...3000 °С з використанням дрібнодисперсних матеріалів або безпосередньо у газовій фазі з застосуванням технології електротермічного псевдозрідженого шару (ЕТПШ). Створення адекватної математичної моделі теплового балансу дозволить прогнозувати потужність необхідну для проведення конкретного процесу та проводити удосконалення реактору з ЕТПШ.

Аналіз літератури. Моделюванню термічних процесів у ЕТПШ присвячені роботи В.А. Бородулі, М.В. Губинського, С.С. Федорова, Л.М. Виноградо-

ва, О.С. Рабіновича, К.Е. Махоріна, С.К. Gupta, D. Sathiyamoorthy [1-4]. Основні дослідження присвячені питанням електропровідності, тепло- і масообміну та гідродинаміки ЕТПШ. Однак математичне моделювання теплового балансу проєктованих реакторів з ЕТПШ вивчено недостатньо. Тому створення математичної моделі теплового балансу з моделюванням введення необхідної кількості теплоти для проведення термічних і термохімічних процесів у ЕТПШ є актуальною задачею.

Метою дослідження описаного у статті є створення та перевірка адекватності математичної моделі теплового балансу реактору з ЕТПШ.

Методика дослідження. При створенні математичної моделі використовувались методи теорії тепломасообміну. Перевірка адекватності моделі проводилась при співставленні розрахункових значень кількості теплоти необхідної для проведення процесу піролізу метану в ЕТПШ та термічного ККД реактору з експериментальними результатами.

Розробка математичної моделі теплового балансу

Аналізуючи літературні джерела [5-6] та використовуючи дані власних попередніх досліджень [7-9] спрощений вигляд математичної моделі теплового балансу для найбільш поширеного типу реактору з ЕТПШ (електрод встановлений у реакційну зону) можна записати наступним чином:

$$Q_{\text{орозр.}} = Q_{na1} + Q_{na2} + Q_{\text{енд.}} + Q_{\text{ТФПШ}} + Q_{mi}, \quad (1)$$

де $Q_{\text{орозр.}}$ – розрахункова кількість необхідної кількості введеної теплоти; Q_{na1} – розрахункова теплота витрачена на нагрівання псевдозріджуючого агента (газу для створення псевдозріджуючого шару); Q_{na2} – розрахункові втрати теплоти зі скидним псевдозріджуючим агентом; $Q_{\text{ТФПШ}}$ – розрахункові втрати теплоти на нагрівання твердої фази псевдозрідженого шару (ТФПШ); $Q_{\text{енд.}}$ – теплота необхідна на покриття ендотермічних ефектів реакції; Q_{mi} – розрахункові втрати теплоти через теплоізоляцію реактора;

При розрахунку моделі проведення ендотермічного процесу в реакторі ЕТПШ необхідно провести попередні термодинамічні розрахунки для визначення температури реакції $T_{\text{реакц.}}$, яка буде прийматися за середню температуру у реакційній зоні.

$$Q_{na1} = G_{na} \cdot \rho_{na} \cdot C_{na} \cdot (T_{\text{реакц.}} - T_{na0}), \quad (2)$$

де G_{na} – прогнозована витрата псевдо-зріджуючого агента, C_{na} – теплоємність псевдо-зрідженого агента, T_{na0} – початкова температура псевдозріджуючого агента, K .

$$Q_{na2} = G_{na} \cdot C_{na} \cdot T_{na1}, \quad (3)$$

де T_{na1} – прогнозована температура газу на виході з реактору, зазвичай висока швидкість газу у реакторах з ЕТПШ дозволяє знехтувати втратами теплоти у середині реактору, тому $T_{na1} = T_{\text{реакц.}} - T_{na0}$. Оскільки при процесах нагрівання псевдозріджуючого агента, в основному, $Q_{na1} = Q_{na2}$ тоді для спрощення рівняння 1 замість елемента рівняння: $Q_{na1} + Q_{na2}$ можна записати $2Q_{na1}$.

$$Q_{\text{енд.}} = \sum G_{\text{реаг.}n} \cdot \rho_n \cdot \Delta H_{298 \text{ реаг.}n},$$

або

$$Q_{\text{енд.}} = G_{p.1} \cdot \rho_{p.1} \cdot \Delta H_{298 p.1} + G_{p.2} \cdot \rho_{p.2} \cdot \Delta H_{298 p.2} + G_{p.n} \cdot \rho_{p.n} \cdot \Delta H_{298 p.n}, \quad (4)$$

де G_p – прогнозована витрата початкового реагенту, $\Delta H_{298 p.}$ – теплота утворення початкового реагенту, ρ_p – густина початкового реагенту, індекс n – назва реагенту. У випадку використання ЕТПШ для нагрівання газу чи ТФПШ витрати теплоти дане рівняння виключається з загальної моделі. У випадку протікання екзотермічної реакції перед даним рівнянням необхідно поставити знак мінус.

$$Q_{\text{ТФПШ}} = P_{\text{ТФПШ}} \cdot C_{\text{ТФПШ}} \cdot (T_{\text{реак.}} - T_{\text{ТФПШ}0}), \quad (5)$$

де $P_{\text{ТФПШ}}$ – швидкість завантаження ТФПШ, $C_{\text{ТФПШ}}$ – теплоємність ТФПШ, $T_{\text{ТФПШ}}$ – прогнозована початкова температура ТФПШ.

У випадку, якщо у реакторі проходить періодичне вивантаження ТФПШ дані прогнозовані теплові витрати $Q_{\text{ТФПШ}}$ можна записати наступним чином:

$$Q_{\text{ТФПШ}} = P_{\text{ТФПШ}} \cdot C_{\text{ТФПШ}} \cdot (T_{\text{реак.}} - T_{\text{ТФПШ}0}), \quad (6)$$

де $P_{\text{ТФПШ}}$ – швидкість вивантаження ТФПШ, $C_{\text{ТФПШ}}$ – теплоємність ТФПШ, $T_{\text{ТФПШ}}$ – прогнозована температура ТФПШ під час вивантаження. Опираючись на попередні експерименти швидкість вивантаження ТФПШ у реакторах з ЕТПШ дозволяє знехтувати втратами температури під час руху ТФПШ через систему вивантаження, тому $T_{\text{ТФПШ}} = T_{\text{реакц.}} - T_{\text{ТФПШ}0}$.

$$Q_{mi} = \frac{T_{\text{реакц.}} - T_{nc}}{\sum \frac{L_i}{\lambda_i \cdot F_i}}, \quad (7)$$

де T_{nc} – прогнозована температура навколишнього середовища, L_i – товщина шару теплоізоляції, λ_i – теплопровідність матеріалу теплоізоляції, F_i – площа поверхні шару теплоізоляції, індекс i – вказує на шар теплоізоляції.

У випадку, якщо реактор охолоджується водою, розрахункові втрати теплоти з водою, що охолоджує реактор Q_{ov} , Вт, можна описати наступним рівнянням:

$$Q_{ov} = G_v \cdot \rho_v \cdot C_v \cdot (T_{v1} - T_{v0}), \quad (8)$$

де G_v – прогнозована витрата води, ρ_v – густина води, C_v – теплоємність води, T_{v0} – початкова температура води, T_{v1} – прогнозована температура води на виході з реактору, яка розраховується наступним чином:

Враховуючи можливі внесенні корективи загальний вигляд математичної моделі теплового балансу у реакторах з ЕТПШ виглядає наступним чином:

$$Q_{0\text{ розрх.}} = 2(G_{na} \cdot \rho_{na} \cdot C_{na} \cdot [T_{\text{реакц.}} - T_{na0}]) + \sum (G_{p.n} \cdot \rho_{p.n} \cdot \Delta H_{298p.n}) + P_{\text{ТФПШ}} \cdot C_{\text{ТФПШ}} \times (T_{\text{реакц.}} - T_{\text{ТФПШ}0}) + P_{\text{ТФПШ}1} \cdot C_{\text{ТФПШ}} \cdot T_{\text{ТФПШ}1} + \frac{T_{\text{реакц.}} - T_{\text{н.с.}}}{\sum \frac{L_i}{\lambda_i \cdot F_i}} + G_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot (T_{\text{в}1} - T_{\text{в}0}). \quad (9)$$

У даних процесах корисним вважається теплота Q_{na1} , $Q_{енд.}$, $Q_{тфпш}$ тому формулу розрахунку термічного ККД ($\eta_{\text{т.розр.}}$) можна записати наступним чином:

$$\eta_{\text{т.розр.}} = \frac{G_{na} \cdot C_{na} \cdot (T_{\text{реакц.}} - T_{na0}) + \sum (G_{p.n} \cdot \rho_{p.n} \cdot \Delta H_{298p.n}) + P_{\text{ТФПШ}} \cdot C_{\text{ТФПШ}} \cdot (T_{\text{реакц.}} - T_{\text{ТФПШ}0})}{G_{na1} \cdot C_{na1} \cdot (T_{\text{реакц.}} - T_{na1}) + P_{\text{ТФПШ}1} \cdot C_{\text{ТФПШ}} \cdot T_{\text{ТФПШ}1} + \frac{T_{\text{реакц.}} - T_{\text{н.с.}}}{\sum \frac{L_i}{\lambda_i \cdot F_i}} + G_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot (T_{\text{в}1} - T_{\text{в}0})}, \quad (10)$$

або

$$\eta_{\text{т.розр.}} = \frac{Q_{na} + Q_{енд.} + Q_{\text{ТФПШ}}}{Q_{na1} + Q_{\text{ТФПШ}1} + Q_{mi} + Q_{ов}}.$$

Оцінка адекватності математичної моделі. Для прикладу візьмемо процес піролізу метану (псевдозріджуючий агент) з осаждением піровуглецю на частинки кварцевого піску (ТФПШ) в реакторі з електротермічному псевдозрідженому шарі [10]. Під час проведення процесу вивантаження матеріалу не проводиться. Для даного реактору математичну модель можна записати у вигляді:

$$Q_{0\text{Тзрозр.}} = G_{CH4} \cdot \rho_{CH4} \cdot C_{CH4} \cdot (T_z - T_{CH40}) + G_{H2} \cdot \rho_{H2} \cdot C_{H2} \cdot (T_z - T_{CH40}) + G_{CH4} \cdot \rho_{CH4} \times \Delta H_{298CH4} + P_{\text{КП}} \cdot C_{\text{КП}} \cdot (T_z - T_{\text{КП}0}) + \frac{T_z - T_{\text{н.с.}}}{\frac{L_1}{\lambda_{\text{зф}} \cdot F_1} + \frac{L_2}{\lambda_{\text{тв}} \cdot F_2} + \frac{L_3}{\lambda_{\text{вц}} \cdot F_3}} + G_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot (T_{\text{в}1} - T_{\text{в}0}), \quad (11)$$

де $Q_{\text{Тзрозр.}}$ – розрахункова кількість введеної теплоти, G_{CH4} – прогнозована витрата метану, ρ_{CH4} – густина метану, кг/м^3 , C_{CH4} – теплоємність метану, ΔH_{298CH4} – теплота утворення метану, G_{H2} – прогнозована кількість утвореного водню, C_{H2} – теплоємність водню, ρ_{H2} – густина водню, $P_{\text{КП}}$ – швидкість завантаження кварцевого піску, $C_{\text{КП}}$ – теплоємність кварцевого піску, T_{CH40} – початкова температура метану, $T_{\text{КП}0}$ – початкова температура кварцевого піску, L_1 , F_1 – довжина та площа першого шару теплоізоляції (графітові елементи реактору), L_2 , F_2 – довжина та площа другого шару теплоізоляції (технічний вуглець), L_3 , F_3 – довжина та площа третього шару теплоізоляції (подрібнена вогнетривка цегла), $\lambda_{\text{зф}}$, $\lambda_{\text{тв}}$, $\lambda_{\text{вц}}$ – теплопровідність відповідно графіту, технічного вуглецю, вогнетривкої цегли. Відповідно до даних попередніх термодинамічних розрахунків: $T_z = 1073 \text{ К}$; 1173 К ; 1373 К .

Експериментальне значення кількості введеної теплоти ($Q_{0\text{Тз експ.}}$) для реакторів з ЕТПШ відповідно до [5-6] визначається за вольт-амперною характеристикою (електричною потужністю):

$$Q_{0\text{Тз експ.}} = I_{\text{Тз експ.}} \cdot U_{\text{Тз експ.}}, \quad (12)$$

де $I_{\text{Тз експ.}}$, $U_{\text{Тз експ.}}$ – відповідно сила струму А та напруга В, які визначаються за реальними показниками вольтметра та амперметра.

Співставлення змодельованого значення необхідної кількості теплоти для проведення процесу піролізу з реальними показниками наведено на рис. 1:

Відповідно до рис. 1 відслідковується динаміка співпадіння математичного моделювання та експериментальних даних. Максимальне відхилення: 11 %, середнє відхилення: 5 ... 7 %, що свідчить про адекватність математичної моделі.

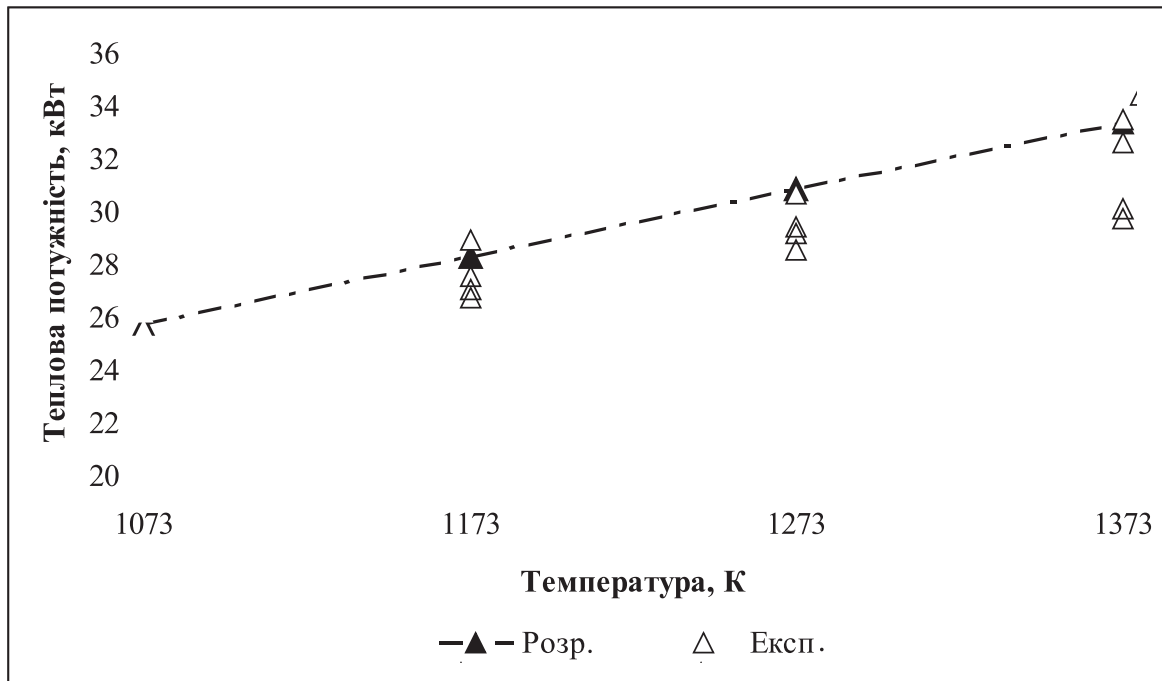


Рис. 1. Співставлення змодельованого значення необхідної кількості теплоти для проведення процесу піролізу з експериментальними показниками.

Математична модель термічного ККД для вищевказаного процесу розраховується наступним чином:

$$\eta_{\text{т.розр.}} = \frac{G_{\text{CH}_4} \cdot \rho_{\text{CH}_4} \cdot C_{\text{CH}_4} \cdot (T_z - T_{\text{CH40}}) + G_{\text{CH}_4} \cdot \rho_{\text{CH}_4} \cdot \Delta H_{298\text{CH}_4} + P_{\text{КП}} \cdot C_{\text{КП}} \cdot (T_z - T_{\text{КП0}})}{G_{\text{H}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2} \cdot C_{\text{H}_2} \cdot (T_z - T_{\text{H}_2}) + \frac{T_z - T_{\text{н.с.}}}{\frac{L_1}{\lambda_{\text{зр.}} \cdot F_1} + \frac{L_2}{\lambda_{\text{тв}} \cdot F_2} + \frac{L_3}{\lambda_{\text{вц}} \cdot F_3}} + G_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot (T_{\text{в1}} - T_{\text{в0}})} \quad (13)$$

Для експериментальних значень термічний ККД розраховується наступним чином:

$$\eta_{\text{т.експ.}} = \frac{G'_{\text{CH}_4} \cdot \rho_{\text{CH}_4} \cdot C_{\text{CH}_4} \cdot (T'_z - T_{\text{CH40}}) + (G'_{\text{CH}_4} \cdot \rho_{\text{CH}_4} \cdot \Delta H_{298\text{CH}_4} + P'_{\text{КП}} \cdot C_{\text{КП}} \cdot (T'_z - T_{\text{КП0}}))}{Q_{0Tz_експ.}} \quad (14)$$

де G'_{CH_4} – реальна витрата метану, $P'_{\text{КП}}$ – реальна швидкість завантаження кварцового піску, $G'_{\text{в}}$ – реальна витрата води, T'_z – температура процесу у реакційній зоні реактору, $T'_{\text{в1}}$ – температура води на виході.

Відповідно до проведених розрахунків $\eta_{\text{т.розр.}} = 57\%$, $\eta_{\text{т.експ.}} = 50 \dots 56\%$, розбіжність складає $6 \dots 9\%$.

Висновки: розроблену математичну модель теплового балансу можна використовувати при проектуванні реакторів з ЕТПШ. Адекватність моделі підтверджується співставленням з реальним термохімічним процесом у реакторі з ЕТПШ. Середнє відхилення математичної моделі теплового балансу і термічного КПД від реальних значень складає $5 \dots 7\%$ та $6 \dots 9\%$ відповідно.

ЛІТЕРАТУРА

1. Малиновский А.И. Локальная проводимость кипящего слоя, состоящая из электропроводящих частиц / А.И. Малиновский, О.С. Рабинович, В.А. Бородуля, А.Ж. Гребеньков, А.М. Сидорович // Инженерно-физический журнал. 2012. т. 85, № 2. С. 239 – 245.
2. Fedorov, S. S., Gubinskii, M. V., Foris, S. N. Mathematical Simulation of the Structural Properties of Packed and Fluidized Beds / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2016. 89(3). P. 627 – 635.
3. Gupta C. K. and Sathiyamoorthy D. Fluid Bed Technology in Materials Processing. New York: CRC Press LLC, 1999. 512 p.

4. Махорин К.Е., Пикашов В.С., Кучин Г.П. Теплообмен в высокотемпературном кипящем слое. К., «Наукова думка». 1981. 148 с.

5. Богомолов В.А. Исследование процесса и разработка технологии пиролиза природного газа в дисперсных средах: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.13. / Богомолов Валерий Алексеевич. – К., 1982. – 211с.

6. Кожан А.П. Исследование электротермических псевдоожигенных систем (применительно к высокотемпературной переработке природного газа). дис. канд. техн. наук. 05.14.13. / Кожан Алексей Пантелеймонович. – К., 1978. – 198 с.

7. Семейко К.В. Использование электротермического псевдоожигенного слоя в качестве внешнего нагревательного элемента реактора / Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2015. № 1. С. 58 – 64.

8. Семейко К.В., Сидоренко Н.А. Теплофизические характеристики реактора с электротермическим псевдоожигенным слоем и комбинированным способом нагревания / Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2018. № 3. С. 59 – 66.

9. Семейко К.В. Теплові характеристики реактору для одержання капсульованого піровуглецем кварцевого піску при проходженні процесу піролізу метану / Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. 2013. № 4. С. 119 – 123.

10. Пат. 83147 Україна, МПК C10G 9/32 (2006.01). Реактор для піролізу газоподібних вуглеводнів / В.О. Богомолов, Б.І. Бондаренко, О.П. Кожан, К.В. Семейко; заявник і патентовласник: Інститут газу НАН України. – № u201303318; заявл. 18.03.2013. опубл. 27.08.2013, Бюл. №16. – 7 с.

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF APPROPRIATENESS FOR MATHEMATICAL MODEL OF HEAT BALANCE OF ELECTROTHERMAL FLUIDIZED BED REACTOR

Simeiko K.V.

The Gas Institute of National Academy of Science of Ukraine; 39, Degtyarivska Str., 03113, Kyiv, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2019.5>

Supply of heat through combustion of organic fuel is impossible or economically unviable for the raw of high temperature processes due to it's technological peculiarities. Some of these processes can be carried out in electrothermal fluidized bed reactors. Development of appropriate mathematical model for heat balance will allow prognostication of capacity needed to carry out specific process and improvement of electrothermal fluidized bed reactor.

During the development of mathematical model methods of heat-mass exchange theory were applied. Verification of appropriateness for mathematical model was carried out through comparison of experimental results and calculated values of the amount of heat needed to perform the process of methane pyrolysis in electrothermal fluidized bed and coefficient of thermal efficiency of electrothermal fluidized bed reactor.

Comparison with real thermochemical process in electrothermal fluidized bed reactor confirms the appropriateness of mathematical model. Average deviation of mathematical model of heat balance and coefficient of thermal efficiency from obtained experimental values is 5...7 % and 6...9 % respectively. Proposed mathematical model can be applied in design of electrothermal fluidized bed reactors.

References 10, figures 1.

Key words: electrothermal fluidized bed, heat balance, mathematical modelling.

1. *Malinovskij A.I., Rabinovich O.S., Borodulja V.A., Greben'kov A.Zh., Sidorovich A.M.* Lokal'naja provodimost' kipjashhego sloja, sostojashhaja iz jelektroprovodjashhih chastic [Local conductivity of the fluidized bed, consisting of electrically conductive particles]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal* [Engineering and Physics Journal], 2012. Vol. 85, № 2. P. 239 – 245. (Rus.)

2. *Fedorov S.S., Gubinskii, M.V., Foris, S.N.* Mathematical Simulation of the Structural Properties of Packed and Fluidized Beds. / *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2016. 89(3). P. 627-635.

3. *Gupta C. K. and Sathiyamoorthy D.* Fluid Bed Technology in Materials Processing. New York: CRC Press LLC, 1999. 512 p.

4. *Mahorin K.E., Pikashov V.S., Kuchin G.P.* Teploobmen v vysokotemperaturnom kipjashhem sloe. [Heat transfer in a high-temperature fluidized bed]. Kiev, Naukova Dumka, 1981. 148 p.

5. *Bogomolov V.A.* Issledovanie processa i razrabotka tehnologii piroliza prirodnogo gaza v dispersnyh sredah [Research of process and technology development of pyrolysis of natural gas in dispersion phases]: dissertation of the candidate of technical sciences. Kiev, 1982. 211 p. (Rus.)

6. *Kozhan A.P.* Issledovaniye elektrotermicheskikh psevdoozhizhennykh sistem (primenitel'no k vysokotemperaturnoy pererabotke prirodnogo gaza) [Investigation of electrothermal fluidized systems (applied to all-temperature processing of natural gas)]: . dissertation of the candidate of technical sciences. Kiev, 1978. 198 p. (Rus.)

7. *Simeiko K.V.* Ispolzovanie elektrotermicheskogo psevdoozhizhennogo sloya v kachestve vneshnego nagrevatel'nogo elementa reaktora [Efficiency of electrothermal fluidized bed applying as the outer heating element of reactor]. *Jenergotehnologii i resursozberezhenie* [Energy technologies and resource]. 2015. № 1. P. 58 – 64. (Rus.)

8. *Simeiko K.V., Sidorenko M.A.* Teplofizicheskie harakteristiki reaktora s jelektrotermicheskim psevdoozhizhenym sloem s kombinirovannym sposobom nagrevanija [Reactor's thermophysical characteristics with an electrothermal fluidized bed with a combined heating method] *Jenergotehnologii i resursozberezhenie* [Energy technologies and resource]. 2018. № 3. P. 59 – 66. (Rus.)

9. *Simeiko K.V.* Teplovi harakteristiki reaktoru dlya oderzhannya kapsulovanogo pirovugletsem kvartseвого pIsku pri prohodzhenni protsesu pIrollzu metanu [Thermal characteristics of the reactor for pyrocarbon encapsulated quartz sand while passing the pyrolysis of methane]. *Visnik SumDU. Seriya Tehnichni nauki* [Sumy State University. Series Technical Sciences]. 2013. № 4. P. 119 – 123. (Ukr.)

10. *Pat. 86131 Ukraine*, B01J 8/18(2006.01), B01J 12/00. Reaktor dlja vysokotemperaturnih procesiv [Reactor for high temperature processes] / V.O. Bogomolov O.P. Kozhan, B.I. Bondarenko, K.V. Simeiko; Applicant and patent holder: Gas institute of National academy of science of Ukraine. № u201309320; applic. date: 25.07.2013; publ. date: 10.12.2013. – Bull № 23. (Ukr.)

Отримано 03.12.2018

Received 03.12.2018

УДК: 621.184.54

ОПТИМІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМІННИКІВ ВИПАРОВУВАЛЬНО-КОНДЕНСАЦІЙНОГО ТИПУ

Гершуні О.Н., канд. техн. наук, **Письменний Є.М.**, докт. техн. наук, **Ніщик О.П.**, канд. техн. наук

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.6>

Стаття присвячена оптимізації конструктивних характеристик теплообмінників "газ-газ" на основі вертикальних поперечно-оребrenних теплопередавальних елементів випарувально-конденсаційного типу. На основі закономірностей процесів теплообміну отримано залежності для визначення оптимального співвідношення довжин зон випаровування і конденсації, при якому система теплопередачі в заданих умовах має мінімальну площу теплообмінної поверхні.

Статья посвящена оптимизации конструктивных характеристик теплообменников "газ-газ" на основе вертикальных поперечно-оребрённых теплопередающих элементов испарительно-конденсационного типа. На основе закономерностей процессов теплообмена получены зависимости для определения оптимального соотношения длин зон испарения и конденсации, при котором система теплопередачи в заданных условиях имеет минимальную площадь теплообменной поверхности.

The paper is relevant to optimization of the performance of gas-to-gas heat exchangers based on vertical transversely finned heat-transferring elements of evaporation-and-condensation type. The correlations taking into account the regularities of heat transfer for estimation of optimal ratio of the lengths of evaporation and condensation zones, under which the heat-transfer system has the minimum transferring surface corresponding to the specified conditions, were obtained.

Бібл. 10.

Ключові слова: теплообмінник випарувально-конденсаційного типу, оптимізація конструктивних характеристик, мінімізація площі теплообмінної поверхні.

a – ширина прохідного перерізу;
 $c_{\text{гр}}, c_{\text{рх}}$ – середні ізобарні теплоємності "гарячого" та "холодного" середовищ;
 d – зовнішній діаметр корпусу ТЕ;
 $d_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр корпусу ТЕ;
 $d_{\text{о}}$ – діаметр основи оребрёння;
 $F_{\text{г}}, F_{\text{х}}$ – площі зовнішньої оребрёної поверхні теплообміну в випарувальній і конденсаційній зонах ТЕ відповідно;
 $F_{\text{в}}, F_{\text{к}}$ – площі поверхні теплообміну в зонах випаровування та конденсації ТЕ відповідно;
 $F_{\text{кт}}^{\text{в}}, F_{\text{кт}}^{\text{к}}$ – номінальні площі сполучення оребрёння з несучою поверхнею корпусу ТЕ в випарувальній та конденсаційній зонах відповідно;
 $G_{\text{г}}, G_{\text{х}}$ – масові витрати "гарячого" та "холодного" середовищ;
 $K_{\text{ф}}$ – відношення площі живого перерізу для проходження газового середовища до повної площі перерізу каналу;
 L – довжина ТЕ, що дорівнює сумі довжин зон випаровування і конденсації;
 $L_{\text{в}}, L_{\text{к}}$ – довжини зон випаровування і конденсації відповідно;
 $n_{\text{тр}}$ – кількість ТЕ в трубному пакеті;
 $\text{Pr}_{\text{г(х)}}$ – числа Прандтля середовищ при їх середніх температурах у відповідних каналах;
 Q_1 – середня величина теплового потоку, що

передається одним ТЕ теплообмінника ($Q_1 = Q / n_{\text{тр}}$);
 $R_{\text{г-х}}$ – сумарний термічний опір теплопередачі в системі від "гарячого" до "холодного" середовища;
 $R'_{\text{г-х}}$ – середній сумарний термічний опір теплопередачі, віднесений до одного ТЕ пакету;
 $R_{\text{кт}}$ – питомий термічний опір контакту оребрёння з несучою поверхнею корпусу ТЕ;
 r – теплота пароутворення проміжного теплоносія;
 $T_{\text{г}}^{\text{вх}}, T_{\text{х}}^{\text{вх}}$ – температури "гарячого" та "холодного" середовищ на вході в теплообмінник;
 $T_{\text{нас}}$ – температура насичення двофазного проміжного теплоносія ТЕ;
 $V_{\text{г(х)}}$ – об'ємні витрати середовищ при відповідних середніх параметрах середовищ в каналах;
 $\alpha_{\text{г}}, \alpha_{\text{х}}$ – середні приведені коефіцієнти тепловіддачі від "гарячого" середовища до зовнішньої оребрёної поверхні випарувальної зони ТЕ і від зовнішньої оребрёної поверхні конденсаційної зони ТЕ до "холодного" середовища відповідно;
 $\alpha_{\text{в}}, \alpha_{\text{к}}$ – середні коефіцієнти тепловіддачі в випарувальній і конденсаційній зонах ТЕ відповідно;
 $\lambda_{\text{р}}, \mu_{\text{р}}, \nu_{\text{р}}$ – коефіцієнти теплопровідності, динамічної і кінематичної в'язкості проміжного теплоносія в рідинному стані;
 $\lambda_{\text{г(х)}}, \nu_{\text{г(х)}}$ – коефіцієнти теплопровідності і кінематичної в'язкості середовищ при їх середніх температурах у відповідних каналах;

ρ_p, ρ_r – густини проміжного теплоносія при температурі насичення в паровому і рідинному стані;
 σ – коефіцієнт поверхневого натягнення проміжного теплоносія при температурі насичення;

φ – коефіцієнт оребрення;
 ВКТ – випаровувально-конденсаційний тип;
 ТЕ – теплопередавальний елемент.

Актуальність роботи. Аналіз особливостей теплових процесів і можливостей традиційних способів теплопередачі в енергетичних технологіях показує доцільність і ефективність створення і впровадження систем теплопередачі ВКТ, або інакше – випаровувально-конденсаційних систем. В цих системах теплопередача здійснюється теплотою фазового перетворення двофазного проміжного теплоносія, невелика кількість якого циркулює по замкнутому випаровувально-конденсаційному контуру. Такі системи можуть бути конструктивно оформлені, як правило, у вигляді окремих або згрупованих в пакет автономних герметичних теплопередавальних пристроїв – теплових труб при здійсненні капілярного транспорту рідкого теплоносія чи двофазних термосифонів при здійсненні гравітаційної течії рідкого теплоносія [1-3].

Ефективність систем теплопередачі ВКТ спричинена наступними важливими їх достоїнствами: 1) забезпеченням просторового розділення джерела і стоку теплоти і, при цьому, високої ефективності теплопередачі від зони підведення до зони відведення теплоти; 2) забезпеченням в широких межах трансформації теплового потоку (його концентрації або деконцентрації в зоні теплопідведення відносно зони тепловідведення) і, зокрема, можливістю перерозподілу довжин зон теплообміну теплопередавальних елементів ВКТ; 3) можливістю ефективного розвинення зовнішньої теплообмінної поверхні в зонах підведення і відведення теплоти; 4) можливістю організації протитоку теплообмінюючих робочих середовищ; 5) суміщенням функцій ефективного теплопроводу (з надвисокою еквівалентною теплопровідністю) і ефективного радіатора з можливістю пасивного тепловідведення і при цьому відносно малими габаритами і масою, високою надійністю роботи при різній орієнтації в полі масових сил; 6) відсутністю витрати енергії зовнішніх джерел на переміщення внутрішнього проміжного теплоносія.

Основними напрямками практичної реалізації розробок і досліджень теплообмінних систем ВКТ в енергетичних технологіях можна вважати наступні.

1. Створення і впровадження теплообмінних апаратів ВКТ в якості виносних хвостових теплообмінних поверхонь і теплоутилізаторів котлів, іншого енергогенеруючого та паливо- і енерговикористовуючого

устаткування. Зважаючи на вищезазначені достоїнства випаровувально-конденсаційних систем, найбільш ефективними теплообмінниками ВКТ є теплообмінники типу "газ-газ" ("газ-повітря") в якості повітропідігрівачів, які впроваджуються в різних галузях [4] як додаткові хвостові теплоутилізатори з суттєвим підвищенням енергоефективності основного устаткування або як теплообмінні апарати, що заміщують зношені штатні повітропідігрівачі з суттєвим економічним ефектом від зменшення капітальних та експлуатаційних витрат.

2. Створення і впровадження пасивних систем тепловідведення і теплового захисту ВКТ стосовно об'єктів атомної енергетики, тому що комплекс вищезазначених достоїнств достатньо точно відповідає вимогам і умовам, що висуваються до пасивних систем теплопередачі в цій галузі. Зокрема, кожний теплопередавальний пристрій ВКТ (окремо або у складі системи) являє собою автономний циркуляційний контур, який може забезпечити високоефективне пасивне тепловіднесення із зони з радіоактивним середовищем в зону кінцевого поглинання теплоти і надійне розділення цих зон. Приклади схемно-конструктивних рішень пасивних систем тепловідведення ВКТ стосовно підсилення бар'єрів безпеки при тяжких аваріях на АЕС, охолодження відпрацьованого ядерного палива в сховищі камерного типу і підвищення вогнестійкості металоконструкцій будівель електростанцій в умовах пожежі представлено в роботі [5].

Вищезазначені достоїнства теплообмінників ВКТ забезпечують при певних умовах їх переваги над іншими типами теплообмінних апаратів. Зокрема, в роботі [6] проведено порівняльний аналіз теплопередавальної здатності теплообмінників "газ-газ" ВКТ і рекуперативних трубчатих теплообмінників. Аналіз показав значну перевагу за тепловими потоками, що передаються, теплообмінників ВКТ, причому ступінь цієї переваги залежить від конструктивних характеристик і параметрів пакетів труб, схем течій середовищ, співвідношень характеристик інтенсивності внутрішнього і зовнішнього теплообміну, термодинамічних характеристик процесів теплопередачі, теплофізичних властивостей теплообмінюючих середовищ і проміжного теплоносія.

Разом з тим, актуальним, безумовно, залишається завдання підвищення ефективності теплообмінників ВКТ

як таких, і зокрема, шляхом проведення оптимізації їх характеристик. Важливою задачею оптимізації є мінімізація площі теплообмінної поверхні, яка призводить до більшої компактності і меншої матеріалоемності теплообмінника ВКТ. З точки зору характеристик теплообмінних процесів таке формулювання задачі фактично тотожне формулюванню мінімізації сумарного термічного опору теплопередачі в системі при заданих видах теплообмінюючих середовищ, їх витратах і вхідних температурах, тепловому потоці, що передається.

Метою дослідження, що представлено в даній статті, є виявлення закономірностей для визначення оптимальних конструктивних параметрів теплообмінників типу "газ-газ" на основі вертикальних поперечно-оребрених трубчатих двофазних термосифонів (далі ТЕ) з точки зору досягнення мінімуму сумарного термічного опору в заданих умовах процесу теплопередачі.

Опис дослідження та отримані результати

Тепловий потік, що передається системою теплопередачі ВКТ і обмежується термодинамічними умовами, при припущенні лінійного змінення температур "гарячого" та "холодного" середовищ в напрямках їх руху та прийманні в якості середньоінтегрального температурного напору середньоарифметичного температурного напору визначається формулою:

$$Q = \frac{T_{\Gamma}^{\text{BX}} - T_{\text{X}}^{\text{BX}}}{R_{\Gamma-\text{X}} + \left(\frac{1}{2c_{\text{pr}} G_{\Gamma}} + \frac{1}{2c_{\text{px}} G_{\text{X}}} \right)}. \quad (1)$$

При проектуванні теплообмінної системи величини T_{Γ}^{BX} , T_{X}^{BX} , G_{Γ} , G_{X} , c_{pr} , c_{px} , Q є заданими. Тому з формули (1) однозначно визначається величина $R_{\Gamma-\text{X}}$. Отже, величина $R_{\Gamma-\text{X}}$ є фактично також заданою при проектуванні системи. Величина $R_{\Gamma-\text{X}}$ дорівнює:

$$R_{\Gamma-\text{X}} = \frac{R'_{\Gamma-\text{X}}}{n_{\text{тр}}}. \quad (2)$$

Величина $R'_{\Gamma-\text{X}}$ визначається формулою:

$$R'_{\Gamma-\text{X}} = \frac{1}{\alpha_{\Gamma} F_{\Gamma}} + \frac{1}{\alpha_{\text{X}} F_{\text{X}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{В}} F_{\text{В}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{К}} F_{\text{К}}} + \frac{R_{\text{КТ}}}{F_{\text{КТ}}} + \frac{R_{\text{КТ}}}{F_{\text{КТ}}}. \quad (3)$$

Для визначення $R'_{\Gamma-\text{X}}$ в формулі (3) не враховані термічні опори теплопровідності стінки корпусу ТЕ в випаровувальній і конденсаційній зонах, що пояснюється зневажно малим внеском цих величин в сумарний термічний опір.

Оскільки величина $R_{\Gamma-\text{X}} = R'_{\Gamma-\text{X}} / n_{\text{тр}}$ є заданою при проектуванні, то мінімізація величини $R'_{\Gamma-\text{X}}$ призведе до відповідної мінімізації кількості ТЕ $n_{\text{тр}}$ в трубному пакеті і тому призведе до мінімізації площі теплообмінної поверхні теплообмінника.

Отже, оптимізація по досягненню мінімальної площі теплообмінної поверхні фактично зводиться до мінімізації величини $R'_{\Gamma-\text{X}}$, яку можна розглядати як цільову функцію оптимізації.

Конструктивною характеристикою трубного пакету теплообмінника ВКТ, яку слід вважати важливою з точки зору можливості її оптимізації для забезпечення мінімізації величини $R'_{\Gamma-\text{X}}$, є співвідношення довжин зон випаровування і конденсації ТЕ, або, відповідно, висот каналів для проходження "гарячого" та "холодного" середовищ при незмінній загальній довжині ТЕ і незмінних габаритних розмірах теплообмінника, що проектується. Дане співвідношення визначається положенням трубної дошки, що розділяє канали, і може змінюватися зі змінням положення трубної дошки відповідно проекту. Змінення даного співвідношення призводить до відповідного перерозподілу площ теплообмінної поверхні в каналах і площ поперечного перерізу каналів для проходження потоків середовищ. А це, відповідно, призводить до перерозподілу термічних опорів, що входять в формулу (3). Отже, змінення співвідношення довжин зон випаровування $L_{\text{В}}$ і конденсації $L_{\text{К}}$ шляхом змінення положення трубної дошки (при незмінній загальній довжині ТЕ L і незмінних габаритних розмірах теплообмінника) призводить до змінення величини $R'_{\Gamma-\text{X}}$.

Тому доцільним є розгляд і аналіз співвідношення довжин $L_{\text{В}}$ і $L_{\text{К}}$ (оптимального положення трубної дошки) для оптимізації даної конструктивної характеристики з точки зору мінімізації термічного опору $R'_{\Gamma-\text{X}}$. Розглянемо цю актуальну задачу, що має суттєве практичне значення.

Введемо позначення $\gamma = L_{\text{В}} / L$. Тоді $L_{\text{В}} = \gamma L$ і $L_{\text{К}} = (1 - \gamma) L$.

Виразимо сумарний термічний опір $R'_{\Gamma-\text{X}}$ як функцію від γ . Для цього представимо окремі термічні опори, що входять як складові в формулу (3), в залежності від величини γ .

Спочатку розглянемо термічні опори

$$(\alpha_r F_r)^{-1} \text{ і } (\alpha_x F_x)^{-1}.$$

За результатами досліджень [7, 8] запишемо:

$$\alpha_{r(x)} = A_{r(x)} \Psi_{r(x)} \alpha_{\text{конв}_{r(x)}},$$

де

$$A_{r(x)} = \frac{F_{p6}}{F} E_{r(x)} \mu_{p6} \Psi_E + \frac{F_T}{F},$$

$$\alpha_{\text{конв}_{r(x)}} = B_{r(x)} W_{r(x)}^m,$$

$$B_{r(x)} = 1,13 C_z C_q \frac{\lambda_{r(x)} \text{Pr}_{r(x)}^{0,33}}{v_{r(x)}^m d_o^{1-m}}.$$

Середні швидкості газових середовищ в живих перерізах каналів дорівнюють:

$$W_r = \frac{\bar{V}_r}{K_F a L \gamma},$$

$$W_x = \frac{\bar{V}_x}{K_F a L (1 - \gamma)}.$$

Формули для площ F_r, F_x запишемо у вигляді:

$$F_r = C \gamma L,$$

$$F_x = C(1 - \gamma)L,$$

де

$$C = \pi d_o \phi.$$

Тоді, враховуючи вищенаведені формули, отримаємо:

$$\frac{1}{\alpha_r F_r} = \frac{(K_F a)^m}{A_r B_r C} \frac{L^{m-1}}{\Psi_r \bar{V}_r^m} \gamma^{m-1}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{\alpha_x F_x} = \frac{(K_F a)^m}{A_x B_x C} \frac{L^{m-1}}{\Psi_x \bar{V}_x^m} (1 - \gamma)^{m-1}. \quad (5)$$

Далі розглянемо термічні опори $(\alpha_b F_b)^{-1}$ і $(\alpha_k F_k)^{-1}$.

Використовуючи результати досліджень [3, 9, 10], формули для α_b, α_k запишемо у вигляді:

$$\alpha_b = D \left(\frac{Q_1}{F_b} \right)^{0,67},$$

$$\alpha_k = E (\pi d_{\text{вн}})^{0,33} Q_1^{-0,33},$$

де

$$D = 0,075 \left[1 + 10 \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_p - \rho_{\text{п}}} \right)^{0,67} \right] \left(\frac{\lambda_p^2}{v_p \sigma T_{\text{нас}}} \right)^{0,33},$$

$$E = 1,04 g^{0,33} \lambda_p \left(\frac{r \rho_p^2}{\mu_p} \right)^{0,33}.$$

Формули для площ F_b, F_k запишемо у вигляді:

$$F_b = \pi d_{\text{вн}} L \gamma,$$

$$F_k = \pi d_{\text{вн}} L (1 - \gamma).$$

Тоді отримаємо:

$$\frac{1}{\alpha_b F_b} = \frac{1}{D (\pi d_{\text{вн}})^{0,33}} \frac{L^{-0,33}}{Q_1^{0,67}} \gamma^{-0,33}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{\alpha_k F_k} = \frac{L^{-1}}{E (\pi d_{\text{вн}})^{1,33}} Q_1^{0,33} (1 - \gamma)^{-1}. \quad (7)$$

Термічні опори $\frac{R_{\text{кт}}}{F_{\text{кт}}^b}$ і $\frac{R_{\text{кт}}}{F_{\text{кт}}^k}$ запишемо у вигляді:

$$\frac{R_{\text{KT}}}{F_{\text{KT}}^{\text{B}}} = \frac{R_{\text{KT}}}{\pi d L} \gamma^{-1}, \quad (8) \quad -0,33 M \gamma^{-1,33} + (N+1)(1-\gamma)^{-2} - \gamma^{-2},$$

$$\frac{R_{\text{KT}}}{F_{\text{KT}}^{\text{K}}} = \frac{R_{\text{KT}}}{\pi d L} (1-\gamma)^{-1}. \quad (9) \quad \frac{d^2 \bar{R}'_{\text{r-x}}}{d\gamma^2} = G(m-1)(m-2)\gamma^{m-3} + H(m-1)(m-2)(1-\gamma)^{m-3} +$$

$$+ 0,44 M \gamma^{-2,33} + 2(N+1)(1-\gamma)^{-3} + 2\gamma^{-3}. \quad (12)$$

Після підстановки формул (4) ÷ (9) в формулу (3) і почленного ділення її на величину $\frac{R_{\text{KT}}}{\pi d L}$ отримаємо формулу (3) в безрозмірному вигляді, що являє собою безрозмірну функцію $\bar{R}'_{\text{r-x}}$, аргументом якої є безрозмірна величина γ :

$$\bar{R}'_{\text{r-x}} = G\gamma^{m-1} + H(1-\gamma)^{m-1} + M\gamma^{-0,33} + (N+1)(1-\gamma)^{-1} + \gamma^{-1}, \quad (10)$$

де безрозмірна функція $\bar{R}'_{\text{r-x}}$ і безрозмірні комплекси-константи G, H, M, N , що включають геометричні характеристики оребреної труби, трубного пакету та теплофізичні характеристики теплообмінюючих середовищ і теплоносія ТЕ, визначаються формулами:

$$\bar{R}'_{\text{r-x}} = \frac{\pi d L}{R_{\text{KT}}} R'_{\text{r-x}},$$

$$G = \frac{\pi d (K_F a L)^m}{R_{\text{KT}} A_{\text{T}} B_{\text{T}} C_{\text{T}} \Psi_{\text{T}} \bar{V}_{\text{T}}^m},$$

$$H = \frac{\pi d (K_F a L)^m}{R_{\text{KT}} A_{\text{X}} B_{\text{X}} C_{\text{X}} \Psi_{\text{X}} \bar{V}_{\text{X}}^m},$$

$$M = \frac{2,15 d L^{0,67}}{R_{\text{KT}} D d_{\text{BH}}^{0,33} Q_1^{0,67}},$$

$$N = \frac{0,69 d Q_1^{0,33}}{R_{\text{KT}} E d_{\text{BH}}^{1,33}}.$$

Перша та друга похідні функції $\bar{R}'_{\text{r-x}} = f_1(\gamma)$ мають вигляд:

$$\frac{d\bar{R}'_{\text{r-x}}}{d\gamma} = G(m-1)\gamma^{m-2} - H(m-1)(1-\gamma)^{m-2} - \gamma^{-2} \quad (11)$$

Оскільки комплекси G, H, M, N є додатними (позитивними) величинами; $0 < m < 1$; $0 < \gamma < 1$, то $\frac{d^2 \bar{R}'_{\text{r-x}}}{d\gamma^2} > 0$. Тому

графік функції $\bar{R}'_{\text{r-x}} = f_1(\gamma)$ є тільки увігнутим, а екстремумом даної функції є тільки мінімум. Умовою екстремуму (мінімуму) даної функції є:

$$\frac{d\bar{R}'_{\text{r-x}}}{d\gamma} = 0.$$

Враховуючи (11), отримаємо:

$$G(m-1)\gamma_{\text{опт}}^m - H(m-1)(1-\gamma_{\text{опт}})^{m-2} \gamma_{\text{опт}}^2 + (N+1)(1-\gamma_{\text{опт}})^{-2} \gamma_{\text{опт}}^2 - 0,33 M \gamma_{\text{опт}}^{0,67} - 1 = 0. \quad (13)$$

Отже, функція $\bar{R}'_{\text{r-x}} = f_1(\gamma)$ має мінімум, а оптимальне значення $\gamma = \gamma_{\text{опт}}$, при якому вона має мінімум, визначається рівнянням (13).

Далі на основі заданих технічних вимог і отриманого значення $\gamma_{\text{опт}}$ виконується тепловий розрахунок, в результаті якого визначається мінімальне значення $n_{\text{тр}}$ і, відповідно, мінімальна величина площі поверхні теплообміну.

Виконані в якості конкретних прикладів розрахунки підтвердили правомірність проведеного аналізу і запропонованих закономірностей для здійснення оптимізації конструктивних характеристик трубних пакетів теплообмінників ВКТ.

Висновки

Визначені достоїнства і переваги систем теплопередачі ВКТ, які обумовлюють їх високу теплотехнічну ефективність, та показані основні напрями практичної реалізації розробок і досліджень таких систем в енергетичних технологіях. Разом з тим, актуальним є завдання подальшого підвищення ефективності теплообмінників

ВКТ, і зокрема, шляхом проведення оптимізації їх характеристик. Тому дана робота присвячена виявленню закономірностей для визначення оптимальних конструктивних параметрів теплообмінників типу "газ-газ" на основі вертикальних поперечно-оребренних трубчатих ТЕ з точки зору досягнення мінімуму термічного опору в заданих умовах процесу теплопередачі і, відповідно, мінімуму площі теплообмінної поверхні.

Виявлена важлива конструктивна характеристика трубного пакету теплообмінника ВКТ з точки зору можливості її оптимізації для забезпечення мінімізації сумарного термічного опору теплопередачі, а саме: співвідношення довжин зон випаровування і конденсації ТЕ, або, відповідно, висот каналів для проходження теплообмінюючих середовищ при незмінній загальній довжині ТЕ і незмінних габаритних розмірах теплообмінника, що проектується.

На основі закономірностей процесів теплообміну отримано функціональну залежність сумарного термічного опору теплопередачі, віднесеного до одного ТЕ пакету і представленого у безрозмірному вигляді, від співвідношення довжин зон випаровування і конденсації. В результаті проведеного дослідження на екстремум цієї функції отримано рівняння для визначення оптимального співвідношення довжин зон, при якому система теплопередачі в заданих умовах має мінімальну площу теплообмінної поверхні.

Актуальним завданням подальших досліджень даного напрямку можна вважати проведення оптимізації конструктивних характеристик трубного пакету з точки зору мінімізації аеродинамічного опору і, відповідно, необхідної потужності при прокачуванні теплообмінюючих середовищ в теплообміннику ВКТ.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Семена М.Г., Гершуни А.Н., Заринов В.К.* Тепловые трубы с металловолоконными капиллярными структурами. – Киев: Вища школа, 1984. – 216 с.
2. *Zohuri B.* Heat Pipe Design and Technology. Second Edition, Switzerland, Springer, 2016, 513 p.
3. *Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О.* Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. – Киев: Факт, 2003. – 480 с.
4. *Гершуни А.Н., Ниццик А.П.* Разработка и внедрение эффективных теплоутилизаторов на основе теплопередающих элементов испарительно-конденсационного типа // Промышленная теплотехника. – 1997. – Т. 19, № 6. – С. 69–73.
5. *Гершуни А.Н., Письменный Е.Н., Ниццик А.П.* Испарительно-конденсационные устройства для систем пассивного теплоотвода в атомной энергетике // Ядерная радиационная безопасность. – 2017. – Вип. 1 (73). – С. 16–23.
6. *Гершуни О.Н., Ниццик О.П.* Порівняльний аналіз теплопередаючої здатності теплообмінників випарувально-конденсаційного типу та рекуперативних трубчатих теплообмінників // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 3. – С. 28–36.
7. *Письменный Е.Н.* Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребранных труб. – Киев: Альтерпрес, 2004. – 244 с.
8. *Письменный Е.Н.* Расчет конвективных поперечно-оребранных поверхностей нагрева. – Киев: Альтерпрес, 2003. – 184 с.
9. *Лабунцов Д.А.* Вопросы теплообмена при пузырьковом кипении жидкости // Теплоэнергетика. – 1972. – № 9. – С. 14–19.
10. *Исаченко В.П.* Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.

OPTIMIZATION OF EVAPORATION-AND-CONDENSATION HEAT-EXCHANGER PERFORMANCE

Gershuni A.N., Pysmennyi Ye.N., Nishchik A.P.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2019.6>

Merits and advantages of the evaporation-and-condensation systems providing their high heat-engineering efficiency are defined and the main ways of their R&D implementation in the technologies of power generation are demonstrated. At the same time, the goal of further increase in efficiency of evaporation-and-condensation heat exchangers is actual and, in particular, by optimization of their performance. Therefore, the study under consideration concerns the regularities determining the optimal design features of gas-to-gas heat exchangers based on vertical transversely finned tubular heat-transferring elements of evaporation-and-condensation type as to the minimum thermal resistance under specified conditions of heat transfer and, respectively, to the minimum heat-exchanging surface.

An important design characteristic of a tubular package of evaporation-and-condensation type allowing to minimize total thermal resistance to heat transfer, namely, ratio of the lengths of evaporation and condensation zones or, respectively, of the channels' heights for heat-exchanging media under unchangeable both total length of heat-transferring elements and overall dimensions of the heat exchanger specified for construction was obtained.

Functional dependence of dimensionless total thermal resistance to heat transfer per one heat-transferring element of the package upon relationship of evaporation and condensation zone lengths was derived on the basis of heat-transfer regularities. Performed extremum research of the function resulted in an equation of optimal relationship between zone lengths for which a heat-transferring system has the minimal surface under the specified conditions.

References 10.

Key words: heat exchanger of evaporation-and-condensation type, optimization of design characteristics, minimization of heat-exchanging surface.

1. Semena M.G., Gershuni A.N., Zaripov V.K. [Heat pipes with metal fiber capillary structures], Kyiv, [High School], 1984, 216 p. (Rus.)

2. Zohuri B. Heat Pipe Design and Technology. Second Edition, Switzerland, Springer, 2016, 513 p.

3. Bezrodnyy M.K., Pioro I.L., Kostyuk T.O. [Processes of transfer in two-phase thermosyphon systems], Kyiv, [Fact], 2003, 480 p. (Rus.)

4. Gershuni A.N., Nishchik A.P. [Elaboration and inculcation of effective heat recoverers based on heat transferring elements of evaporation-condensation type], [Industrial Heat Engineering], 1997, V.19, No.6, P.69-73. (Rus.)

5. Gershuni A.N., Pysmennyi Ye.N., Nishchik A.P. [Evaporation-condensation devices for passive heat removal systems in nuclear power engineering], [Nuclear and Radiation Safety], 2017, No.1(73), P.16-23. (Rus.)

6. Gershuni A.N., Nishchik A.P. [A comparative analysis of heat transfer capabilities of evaporation-condensation type heat exchangers and recuperative tube-type heat exchangers], [Industrial Heat Engineering], 2010, V.32, No.3, P. 28-36. (Ukr.)

7. Pysmennyi Ye.N. [Heat exchange and aerodynamics in the package of transversely finned tubes], Kyiv, [Alterpres], 2004, 244 p. (Rus.)

8. Pysmennyi Ye.N. [Estimation of convective transversely finned heating surfaces], Kyiv, [Alterpres], 2003, 184 p. (Rus.)

9. Labuntsov D.A. [The aspects of heat exchange in nucleate boiling of liquid], [Thermal Engineering], 1972, No.9, P.14-19. (Rus.)

10. Isachenko V.P. [Condensation heat exchange], Moscow, [Energy], 1977, 240 p. (Rus.)

Отримано 12.03.2019

Received 12.03.2019

УДК: 621.31:551.58

О НОВОМ ВЗГЛЯДЕ НА ДИНАМИКУ КЛИМАТА ЗЕМЛИ (ОБЗОР)

Басок Б.И., чл.-кор. НАН Украины, Базеев Е.Т., канд. техн. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03057, Украина

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2019.7>

В обзоре представлены подходы относительно свойств климатической системы Земли, не совпадающие с общепризнанными. Результаты недавних исследований показывают более сложную (ступенчатую) временную динамику глобальной температуры, что позволяет говорить о присутствии в климатической системе терморегулирующего механизма, при идентификации которого можно будет оценить вероятность перехода в сторону повышения или понижения глобальной температуры. Приведены также результаты исследований механизма солнечно-магнитной активности как главной причины глобального потепления.

В огляді представлені підходи щодо властивостей кліматичної системи Землі, що не збігаються з загальноприйнятими. Результати недавніх досліджень показують більш складну (ступеневу) тимчасову динаміку глобальної температури, що дозволяє говорити про присутність в кліматичній системі терморегулюючого механізму, при ідентифікації якого можна буде оцінити ймовірність переходу в бік підвищення або зниження глобальної температури. Наведено також результати досліджень механізму сонячно-магнітної активності як головної причини глобального потепління.

The review presents approaches with respect to the properties of the Earth's climate system, which do not coincide with generally accepted ones. The results of recent studies show a more complex (stepwise) temporal dynamics of global temperature, which suggests the presence of a thermoregulatory mechanism in the climate system, which, if identified, will be able to estimate the likelihood of a transition to an increase or decrease in global temperature. The results of studies of the mechanism of solar-magnetic activity as the main cause of global warming are also given.

Библ. 10, рис. 5.

Ключевые слова: климатическая система Земли, парниковые газы, концентрация диоксида углерода, глобальная температурная динамика, терморегулирующий механизм, солнечно-магнитная активность, оптически-тонкая облачность.

Для прогнозов глобального изменения климата в настоящее время в качестве научной базы используются результаты научных исследований Межправительственной группы экспертов по проблеме изменения климата (МГЭИК), созданной в 1988 году Международной метеорологической организацией ООН (в группу входило около 2500 исследователей и экспертов со всего мира). Начиная с 1990 года, МГЭИК периодически готовит отчёты с прогнозами оценок роста концентрации диоксида углерода в атмосфере и повышения глобальной температуры до конца XXI столетия. В зависимости от сценариев развития мировой энергетики прогнозировалось к 2100 году по сравнению с концом XX века увеличение концентрации CO_2 от 400 до 790 млн⁻¹. (миллионные доли или ppm – количество молекул CO_2 среди 1 млн. молекул газов воздуха) и температуры на 1...4 °C [1]. Были и более тревожные прогнозы – повышение концентрации CO_2 от 540 до 970 млн⁻¹. и температуры на 1,4...5,8 °C [2]. Относительно безопасным считается повышение концентрации CO_2 до 470 млн⁻¹. [3] и глобальной температуры на 1,7 [3], 1,5...1,7 °C [4], 2 °C [5].

Такие размытые показатели прогнозов изменения концентрации диоксида углерода и глобальной приземной температуры определяются ограниченностью

научных знаний о механизмах сложных, недостаточно изученных естественных процессов в природе, трудно прогнозируемых трендов развития мировой экономики, энергетики в условиях неопределённости ряда факторов. Это обстоятельство отмечено и в Климатической конвенции, один из ключевых пунктов которой гласит: «отметить наличие ряда неопределённостей в предсказаниях климатических изменений, в частности в отношении временных, амплитудных и региональных особенностей» [1]. Рекомендовалось усилить научные исследования, усовершенствовать модели углеродного цикла и климата, уточнить неопределённости по глобальному потеплению [1].

Расчёты МГЭИК характеризуются всё более повышающейся сложностью и широким диапазоном получаемых данных по оценкам изменения концентрации CO_2 в атмосфере и среднеглобальной температуры, вплоть до 5 °C. Допускается значительный разброс и в оценке такого важного показателя, как чувствительность к изменению содержания парниковых газов в атмосфере при удвоении концентрации CO_2 – (1,5...5,5 °C) [6], (1,5...4,5 °C) [7].

Не все специалисты и научные коллективы разделяют такой драматический подход и выводы МГЭИК.

По разным сценариям и моделям к концу века глобальное среднегодовое потепление составит 1,2...2,6 °C и 0,9...1,2 °C [8], а чувствительность глобальной климатической системы – 1,9 °C [6].

Не разделяются и подходы МГЭИК относительно характера долговременной глобальной температурной динамики [7]. В моделях МГЭИК демонстрируется непрерывный рост антропогенного парникового воздей-

ствия (рис. 1) и непрерывный рост глобальной приповерхностной температуры (рис. 2).

С использованием недавно предложенного подхода к анализу пространственновременной динамики глобальной температуры показано, что «климатическая система демонстрирует поведение иного рода, чем предполагаемое парадигмой МГЭИК» [7]. Несмотря на растущую концентрацию парниковых газов, наблюде-

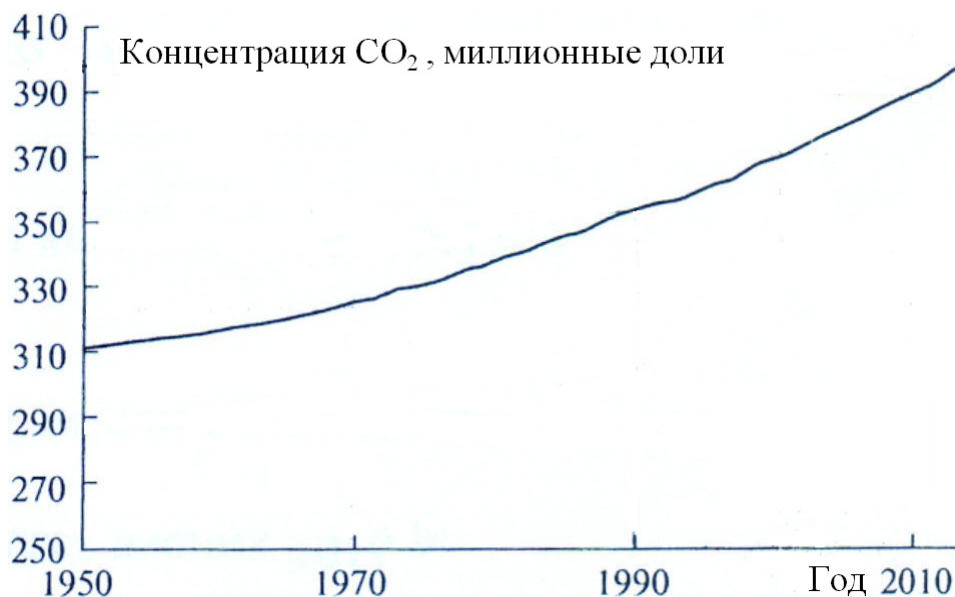


Рис. 1. Рост концентрации диоксида углерода в атмосфере [7].

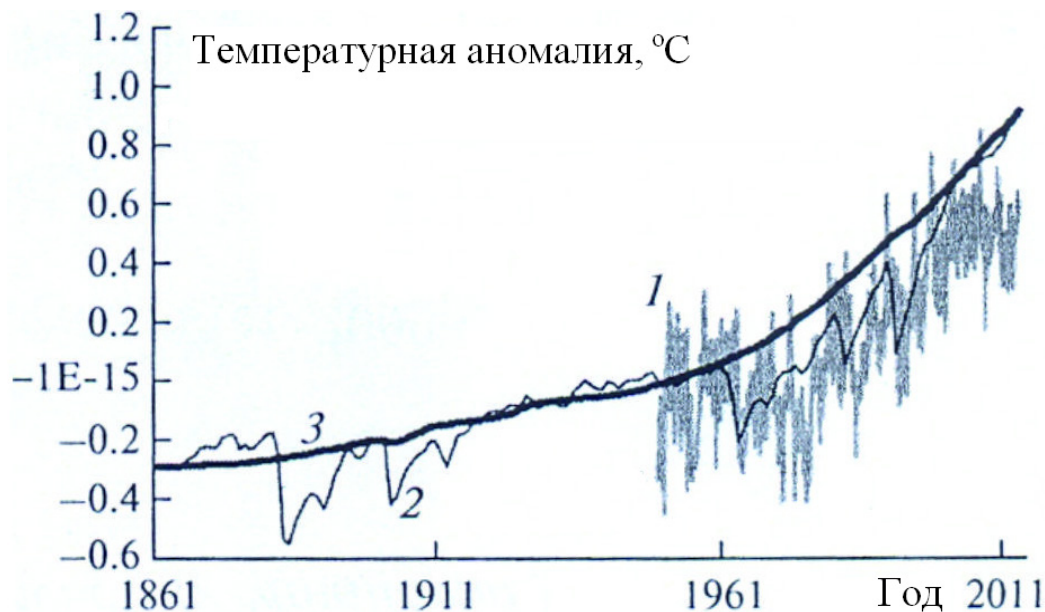


Рис. 2. Сравнение наблюдений (1 - колебания) и расчетов (2 – ансамбль моделей, 3 – упрощенная модель, жирная гладкая линия) глобальной приповерхностной температуры [7].

ния показывают более сложную структуру временной динамики глобальной температуры, а именно: обнаруживаются постоянные короткие флуктуации температуры, в частности, квазистационарное состояние температуры, начиная с 1998 года (рис. 3) [7]. Такие паузы в динамике среднелобальной температуры приземного слоя можно заметить и при внимательном взгляде на инструментальные измерения температуры с середины XIX века до настоящего времени (рис. 4) [6]. Ступенчатая динамика глобальной температуры показывает обязательное присутствие в климатической системе термостабилизирующих механизмов. Эксперты МГЭИК

объясняют это случайными обстоятельствами. Но стохастический характер сразу трёх пауз представляется сомнительным. Пока нельзя достоверно указать причины скачков температуры, можно лишь описать произошедшие изменения. Скорее всего действует некий термостабилизирующий фактор. Как отмечается в [7], выявление механизма природы такого фактора может потребовать тщательного анализа сложных моделей по анализу климатической системы. Вполне возможно, что с повышением приповерхностной температуры, синхронно скачкообразно изменяются и будущие параметры климата и проявляют себя сложные обратные связи.

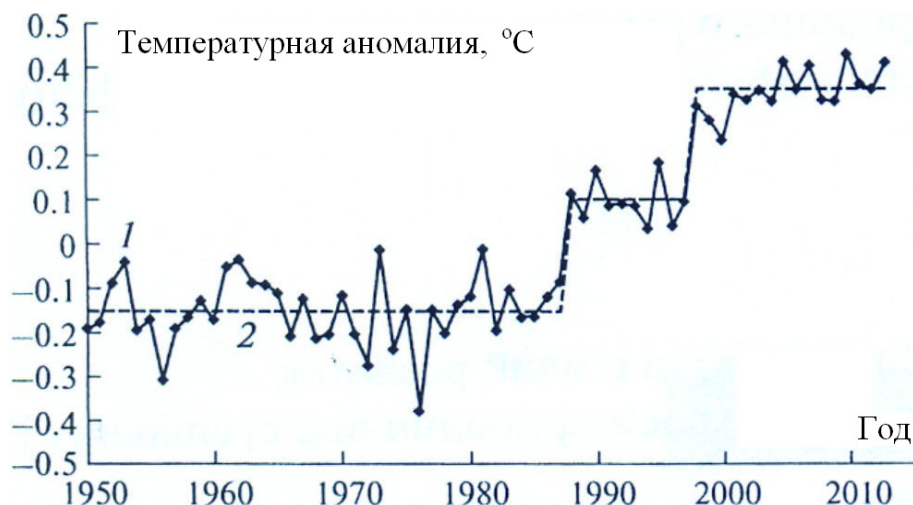


Рис. 3. Среднегодовые вариации температуры, 1 – средняя за год глобальная температурная аномалия, 2 – аппроксимация модельной ступенчатой функцией [7].

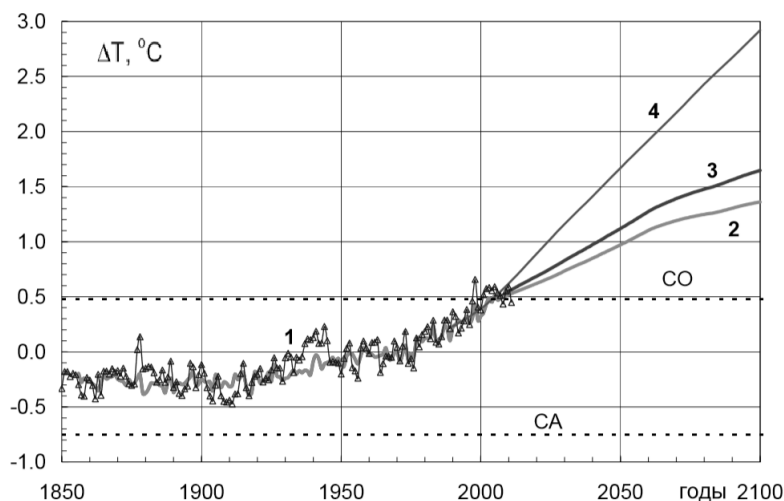


Рис. 4. Изменения среднелобальной температуры приземного слоя воздуха (по сравнению с уровнем 1950-1980 г.), 1 – данные измерений, сценарии: 2 – экологический, 3 – исторический, 4 – прогноз Киотского протокола. CA и CO – температурные уровни субатлантической эпохи и средневекового оптимума [6].

Если удастся раскрыть термостабилизирующий механизм отмеченных выше пауз повышения температуры, то появится возможность оценивать вероятность перехода в сторону повышения или, наоборот, в сторону понижения глобальной температуры. Нет сомнений в существовании парникового эффекта, но его влияние может быть не монотонным на динамику изменения глобальной температуры, а более сложным [7].

Нет единого мнения специалистов и о природе парникового эффекта. Как известно, МГЭИК объясняет повышение глобальной температуры возрастанием концентрации в атмосфере парниковых газов, главным образом, диоксида углерода, вследствие их антропогенных выбросов. Не все в научном сообществе разделяют подход МГЭИК об определяющей роли антропогенных выбросов в повышении глобальной температуры. Наличие парникового эффекта никто не отрицает, но по-иному определяют природу такого эффекта. Например, специалисты по физической оптике нижней атмосферы [9] объясняют природу современного глобального потепления воздействием факторов солнечно-магнитной

активности (вспышки на Солнце, магнитные бури). Поток микроволн из ионосферы образует в тропосфере из кластеров водяного пара конденсационно-кластерную дымку, переходящую в оптически тонкую облачность (в виде «молодых» перистых облаков), которая экранирует поток тепла в космос из нижней тропосферы и подстилающей поверхности. Происходит разогрев приземного воздуха и поверхности Мирового океана, рис. 5 [9]. Пары воды – основной парниковый газ в тропосфере и его содержание намного больше (до 36...70 %) по сравнению с содержанием (9...26 %) CO_2 , (4...9 %) метана или (3...7 %) озона [9]. Таким образом, кластерообразование из паров воды, приводящее к созданию оптически тонкой облачности, становится основной причиной современного глобального потепления в эпоху прохождения в конце XX и в начале XXI столетия как солнечной, так и геомагнитной активности. Выброс парниковых газов антропогенного происхождения (главным образом диоксида углерода, метана), естественно, усиливает эффект глобального потепления.

Как отмечается в [9], развиваемые исследования



Рис. 5. Схема воздействия солнечно-геомагнитной активности на тропосферные метеопараметры под влиянием радиооптического трехступенчатого триггерного механизма [9].

солнечно-геомагнитной активности и техногенного электромагнитного шума (в том числе передающих устройств мобильной связи) позволят лучше понять механизм влияния сравнительно слабых воздействий на биосферу и окружающую среду, в частности, и на погодно-климатические характеристики.

Если говорить о прогнозах развития энергетики, то согласно «опыту генетических прогнозов мировой энергетики» в ближайшие десятилетия будут проявлять себя тенденции [10]:

1) стабилизация национального удельного энергопотребления на душу населения на уровне, который в основном определяется климато-географическими факторами;

2) неуклонное и практически линейное снижение со временем углеродной интенсивности мировой энергетики (количество диоксида углерода, приходящейся на единицу потребления энергии). Тренд изменений структуры топливно-энергетического баланса, наблюдается уже более ста лет (переход от угля к нефти, газа и в последнее время – к увеличенным объемам возобновляемых энергоресурсов).

Последняя тенденция приводит, как отмечено в [10], к снижению темпов роста антропогенного воздействия на климатическую систему и следует ожидать весьма умеренных изменений состава атмосферы и климата планеты.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Мировая энергетика будущего* – время действовать. Документы МИРЭС 2000. Мировой энергетический Совет. Справочный перевод. 2000. – 175 с.
2. *Стан світу 2002* / К. Флавін та ін. Пер. з англійської: ВГО «Україна. Порядок денний на XXI століття та інститут сталого розвитку» – К.: Інтелсфера. 2002. – 289 с.

3. *Терешин А.Г., Клименко А.В., Клименко В.В.* Золотой век газа и его влияние на мировую энергетику, глобальный цикл углерода и климат // Теплоэнергетика. 2015. №5. – С. 3–13.

4. *Демерчян К.К., Демерчян К.С., Кондратьев К.Я.* Темп роста концентрации CO₂ и уточнение его прогнозных оценок // Изв. РАН. Энергетика. 2001. №1. – С. 3–35.

5. *Елисеев А.В.* Глобальный цикл CO₂ // <https://docplayer.ru/62542231-Globalnyy-cikl-so2-a-v-eliseev-ifa-im-a-m-obuhova-ran-kazanskiy-privolzhskiy-federalnyy-universitet.html>.

6. *Клименко В.В., Терешин А.Г.* Мировая энергетика и глобальный климат в XXI веке в контексте исторических тенденций: пределы роста // Универсальная и глобальная история. Эволюция Вселенной, Земли, жизни, общества / Под ред. Л. Е. Гринина, И. В., Ильина А. В. Коротаяева. – Волгоград: Учитель, 2012. – С. 608–621. – 688 с. – (Библиотека факультета глобальных процессов МГУ).

7. *Барцев С.И., Белолипецкий П.В., Дегерменджи А.Г.* и др. Новый взгляд на динамику климата Земли // Вестник РАН. 2016. Т. 86. № 3. – С. 244–251.

8. *Аржанов М.М.* и др. Оценка климатических изменений в Северном полушарии в XXI веке при альтернативных сценариях антропогенного воздействия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. №6. – С. 643–654.

9. *Авакян С.В.* Супрамолекулярная физика окружающей среды: климатические и биофизические эффекты // Вестник РАН. 2017. Т. 87. № 5. – С. 456–466.

10. *Клименко В.В.* Опыт генетических прогнозов мировой энергетики: можем ли мы предвидеть далёкое будущее // Доклады академии наук. Энергетика. 2014. Т. 458. №4. – С. 415–418.

ON THE NEW LOOK AT THE DYNAMICS OF THE EARTH'S CLIMATE (REVIEW)

Basok B.I., Bazeev T.T.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2019.7>

The review article presents a comparative analysis of predicting the dynamics of changes in carbon dioxide concentration in the Earth's atmosphere and the global surface temperature. If the approaches and conclusions of the International Panel on Climate Change demonstrate a monotonous increase in carbon dioxide concentration in the Earth's atmosphere and global surface temperature, the IPCC opponents, without denying the effect of greenhouse gases on global temperature, find that increases not monotonously, but intermittently, starting from the middle of the 20th century. Such pauses in the dynamics of global temperature changes are probably explained by the presence of some thermal stabilizing mechanism, the nature of which needs to be further explained. Determining such a mechanism for the appearance of the temperature pauses noted above will help to estimate the probability of a global temperature moving downwards or, conversely, upwards.

The results of studies of the mechanism of solar-magnetic activity, the main reason for the increase in the global surface temperature, are also presented.

References 10, figures 5.

Key words: Earth's climate system, greenhouse gases, carbon dioxide concentration, global temperature dynamics, thermostatic mechanism, solar-magnetic activity, optical-thin clouds.

1. [World energy of the future – time to act], Dokumenty MIREs 2000. Mirovoy energeticheskiy Sovet. Spravochnyy perevod [WEC documents 2000. World Energy Council. Reference translation]. 2000. 175p. (Rus.)

2. Flavin K., Franch G., Gardner G. and others [The state of the world – 2002], per. from english NGO "Ukraine. The Agenda for the XXI Century" and the Institute for Sustainable Development, Kyiv, Intelsfera [Intelsphere]. 2002. 289p. (Ukr.)

3. Tereshin A.H., Klimenko A.V., Klimenko V.V. [The Golden Age of Gas and its Impact on the World Energy Sector, the Global Carbon Cycle and Climate], Teploenergetika [Thermal Engineering], 2015. № 5. P. 3–13. (Rus.)

4. Demerchian K.K., Demerchian K.S., Kondratev K.Ya. [The growth rate of CO₂ concentration and the refinement of its forecast estimates], Izvestiia RAN. Enerhetika [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2001. № 1. P. 3–35. (Rus.)

5. Eliseev A.V. [The global CO₂ cycle: main processes and interactions with climate], Fundamentalnaia i prikladnaia klimatologhiia [Fundamental and Applied Climatology], 2017. V. 4. P. 9–31. (Rus.)

6. Klimenko V.V., Tereshin A.H. [World Energy and Global Climate in the 21st Century in the Context of Historical Trends: Growth Limits], Universal and Global History. Evolution of the Universe, Earth, Life, Society. Ed. Hrinin L. E., Ilin I. V., Korotaiev A. V., Volgograd, Uchitel [Teacher], 2012. P. 608–621. (Rus.) (Library of the Faculty of Global Processes, Moscow State University)

7. Bartsev S.I., Belolipetskii P.V., Dehermendzhi A.H. et al. [New Look at the Dynamics of the Earth's Climate], Vestnik RAN [Herald of the Russian Academy of Sciences], 2016. V. 86. № 3. P. 244–251. (Rus.)

8. Arzhanov M.M. et al. [Assessment of Climate Change in the Northern Hemisphere in the 21st Century under Alternative Scenarios of Anthropogenic Influence], Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and Oceanic Physics], 2012. V. 48. № 6. P. 643–654. (Rus.)

9. Avakian S.V. [Supramolecular Physics of the Environment: Climatic and Biophysical Effects], Vestnik RAN [Herald of the Russian Academy of Sciences], 2017. V. 87. № 5. P. 456–466. (Rus.)

10. Klimenko V.V. [Experience of genetic forecasts of world energy: can we foresee the distant future], Doklady akademii nauk. Enerhetika [Doklady Academy of Sciences. Energy], 2014. V. 458. № 4. P. 415–18. (Rus.)

Получено 06.05.2019

Received 06.05.2019

УДК 620.9.64

СКОРОЧЕННЯ СПОЖИВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ТА ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН З ПРОДУКТАМИ СПАЛЮВАННЯ В КОМУНАЛЬНІЙ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ

Сігал О.І.¹, канд. техн. наук, Падерно Д.Ю.¹, канд. фіз.-мат. наук, Павлюк Н.Ю.¹, канд. техн. наук,
Сафьянц А.С.¹, канд. техн. наук, Бикоріз Є.Й.¹, Плашихін С.В.², канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. М. Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
ім. Ігоря Сікорського, пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.8>

Розглядаються шляхи скорочення споживання природного газу в комунальній теплоенергетиці: заміна застарілих котлів середньої потужності на розроблені авторським колективом сучасні вискоефективні котли, необхідність та доцільність корегування температурного графіка теплових мереж, вироблення теплової енергії з альтернативного джерела енергії – твердих побутових відходів, а також шляхи досягнення виконання європейських екологічних нормативів за рахунок застосування розробленого авторами обладнання.

Рассматриваются пути сокращения потребления природного газа в коммунальной теплоэнергетике: замена устаревших котлов средней мощности на разработанные авторским коллективом современные высокоэффективные котлы, необходимость и целесообразность корректировки температурного графика тепловых сетей, производство тепловой энергии из альтернативного источника энергии – твердых бытовых отходов, а также пути выполнения европейских экологических нормативов за счет применения разработанного авторами оборудования.

The ways for reduction of the natural gas consumption in municipal heat supply systems are considered: replacement of obsolete medium capacity boilers with the modern high efficient boilers developed by the team of authors, necessity and expediency of adjusting the temperature regime of heat supply networks, production of heat energy from alternative energy source - municipal solid waste, as well as ways to meet the new European environmental standards through the use of equipment developed by the authors team.

Бібл. 13, рис. 5.

Ключові слова: природний газ, централізовані системи теплопостачання, тепла енергія, котел, тверді побутові відходи, газоочищення, тверді частинки, відцентровий фільтр, циклонний пиловловлювач.

В останні роки в Україні в умовах жорсткої фінансової кризи та багаторазового підвищення тарифів на енергоносії постає питання зменшення залежності країни від імпортованих енергоносіїв, зокрема природного газу. Як відомо, існують два основні шляхи досягнення цього – безпосередньо зменшення споживання, в першу чергу за рахунок підвищення ефективності енергоспоживання, та заміщення природного газу іншими джерелами енергії [1].

У цій роботі пропонуються технічні рішення щодо скорочення споживання природного газу, а також щодо зниження викидів шкідливих речовин з продуктами спалювання в комунальній теплоенергетиці.

Котельне обладнання

В тарифах на централізоване опалення 60...85 % складає вартість природного газу. Водночас, з близько 47 тисяч котлів, що працюють на підприємствах житлово-комунального господарства, більше 4 тисяч – це фізично та морально застарілі низкоефективні котли

типу НІИСТУ-5 та подібних, експлуатація яких призводить до перевитрат біля 600 млн. м³/рік природного газу. Загалом котли потужністю менше 3 Гкал/год. складають 87 % всього котельного парку житлово-комунального господарства України.

Розроблення та впровадження сучасних вітчизняних вискоефективних котлів дозволить скоротити споживання природного газу підприємствами теплокомуненерго майже на 15 %, а також дасть роботу вітчизняним котлобудівним заводам. Враховуючи наявність на балансах підприємств ЖКГ ~ 5300 водогрійних опалювальних котлів теплопродуктивністю від 0,5 до 2 МВт, що підлягають заміні, досліджувалось та розроблялось котельне обладнання тепловою потужністю у цьому діапазоні.

Авторським колективом розроблено декілька відмінних за конструктивом газових водогрійних котлів потужністю 0,63 МВт, 1 МВт та 2 МВт (рис. 1), що працюють на газі низького тиску, призначених для застосування в системах опалення і гарячого водопостачання,

широкомасштабне впровадження яких здатне замінити низькоефективні котли [2, 3, 4].

Розроблений водогрійний водотрубний котел потужністю 2 МВт типу КВВ-2,0 Гн (рис. 1, а) [2] має П-подібну компоновку з розміщеною в газоході конвективною поверхнею нагріву. Топкова камера екранована трубами $\varnothing 51 \times 3,5$ мм, які зварені між собою плавниками. Конвективна поверхня нагріву набирається зі зварених між собою пакетів U-подібних труб $\varnothing 28 \times 3$ мм. Котел виконується в легкій теплоізоляції і декоративному кожусі, комплектується блочним газовим пальником низького тиску та системою автоматики.

Впровадження цих котлів в системі ОП «Кримтеплокомуненерго» дозволило замінити застарілі котли та збільшити теплову потужність існуючих котельнь, підвищити економічність і надійність джерел теплопостачання.

Характерною відмінністю водогрійного водотрубного котла КВВ-1,0 Гн потужністю 1 МВт (рис. 1, б) є можливість заміни конвективної частини конденсаційним теплообмінником. Для зниження температури продуктів спалювання після топки з $800 \dots 900$ °С до $100 \dots 300$ °С, перед конденсаційним теплообмінником може бути встановлений випарний барботажний апарат, в якому одночасно виконується кілька технологічних операцій [5]:

- зниження температури і насичення водяною парою продуктів спалювання;
- очищення забрудненої води для подальшого

використання в теплових мережах та на власні потреби котельні. Фактично після барботажу і конденсації водяної пари з парогазової суміші отримується конденсат з підвищеною кислотністю ($\text{pH} < 6 \div 4$) за рахунок значної кількості CO_2 в продуктах спалювання. Нормалізація кислотності води відбувається в декарбонізаторі.

- осадження в барботажному апараті солей різних металів.

Температура продуктів спалювання на виході з котла після барботажного випарника складає близько 95 °С за рахунок проходження через шар води.

Впровадження котла КВВ-1,0 Гн замість НІИ-СТУ-5 забезпечує економію природного газу на $9 \dots 13$ % та в 2 рази збільшує теплову потужність котельні.

Така котельна установка може працювати в режимі водопостачання, а також як опріснювач, як установка очищення мінералізованої стічної води та інших солейбагатих і агресивних вод з метою економії прісної води.

Комбінований водотрубно-димогарний котел КВВД-0,63 Гн теплопродуктивністю 630 кВт (рис. 1, в) є першим котлом такого типу [4].

Топкова камера котла включає жарову трубу і екранну систему з кільцевими трубними дошками. У топковій камері між задньою і передньою водяними кільцевими камерами вварені 36 екранних труб, які розподілені на 12 триходових пучків.



а)



б)



в)

Рис. 1. Розроблені водогрійні котли:

а) котел типу КВВ-2,0 Гн [2]; б) котел типу КВВ-1,0 Гн [3]; в) котел типу КВВД-0,63 Гн [4].

Полум'я пальника розвивається в кільцевій екранній камері, яка закрита в донній частині. Камера працює з надлишковим тиском димових газів, які надходять в 2 вогневі труби, потім в поворотну камеру і по димогарних трубах в димову коробку, розташовану в задній частині котла. З димової коробки газу надходять в димову трубу і в атмосферу.

У димогарні труби котла вставлені пластинчасті турбулізатори (завихрювачі), які надають потоку газів в трубах турбулентність і в результаті підвищують тепловіддачу, величину якої можна регулювати довжиною турбулізаторів.

Сучасне котельне устаткування повинно відповідати вимогам екологічних норм, які дедалі становляться жорсткішими. Розроблений котел КВВД-0,63 Гн за рахунок зменшення рівня температур у топковому просторі дозволяє знизити концентрації оксидів азоту в димових газах на 20...25 %, при цьому рівень викидів шкідливих речовин задовольняє вимогам чинних нормативів України.

Пілотний зразок водогрійного водотрубно-димогарного котла КВВД-0,63 Гн пройшов сертифікаційні випробування, державну реєстрацію, успішно експлуатується в районній котельні м. Києва. Котел показав себе надійним обладнанням, простий у виготовленні і може вироблятися в умовах ремонтних цехів підприємств комунального теплопостачання. Економічний ефект за рахунок скорочення споживання палива від заміни котла ННІСТУ-5 на котел КВВД-0,63 Гн складає від 10 до 30 т у.п./рік в залежності від режимів роботи.

Технічні характеристики розроблених котлів представлені в таблиці 1.

Коригування температурного графіку теплової мережі

Одним з найважливіших факторів, що впливають режим роботи системи теплопостачання, є температур-

ний графік теплової мережі. Більшість систем теплопостачання міст України, в тому числі й Києва, було спроектовано та побудовано за часи Радянського Союзу, коли пріоритет надавався зменшенню металоємності, а отже, діаметрів теплових мереж, а не ефективності використання енергоносіїв. Тому в якості розрахункових були прийняті високі температури теплоносія, досягати яких було технічно складно вже тоді, а на цей час з урахуванням зношеності обладнання практично неможливо, та надто затратно.

Так, положенням ПАТ «Київенерго» «Про температурний графік теплових мереж, адекватний реальній потребі споживачів теплової енергії», починаючи з опалювального сезону 2005-2006 року було впроваджено температурний графік 115/57 °С, який являє собою розрахунковий температурний графік 150/70 °С з науково обґрунтованим зрізанням.

Графік 115/57 °С було запропоновано до впровадження у 2005 році як адекватний потребам споживачів, але з того часу значно змінились величина та структура приєднаного навантаження, тому виникла потреба у аналізі можливості застосування цього графіку в поточних умовах та приведення його у відповідність до реальної теплової потреби споживачів та реальних можливостей теплопостачальних підприємств.

Аналіз температурного графіка системи централізованого теплопостачання міста Києва показав, що він не відповідає реальним потребам споживачів. Це підтверджується статистичними даними роботи теплових мереж, представленими на рис. 2.

Аналіз реального теплового навантаження теплоджерел з урахуванням проектного навантаження та кількості теплоти, що була відпущена споживачам, із збереженням комфортних умов життя, показав, що фактичне навантаження у РТМ міста Києва складає від 52 % до 81,6 % відносно підключеного (рис. 3), при цьому середнє по всім РТМ складає 65,3 %.

Таблиця 1. Технічні характеристики котлів

Параметр \ Тип котла	КВВ-2,0 Гн	КВВ-1,0 Гн	КВВД-0,63 Гн
Теплопродуктивність, МВт	2,0	1,0	0,63
Витрати газу, нм ³ /год.	211,6	117	70
Витрати води, м ³ /год.	72	34,4	22
Температура вихідних газів за котлом, °С	178	160	160...80*
Вміст NO _x у димових газах, мг/м ³	100	90	84
ККД, %	92,9	92,3	92...97*

* - значення з економайзером

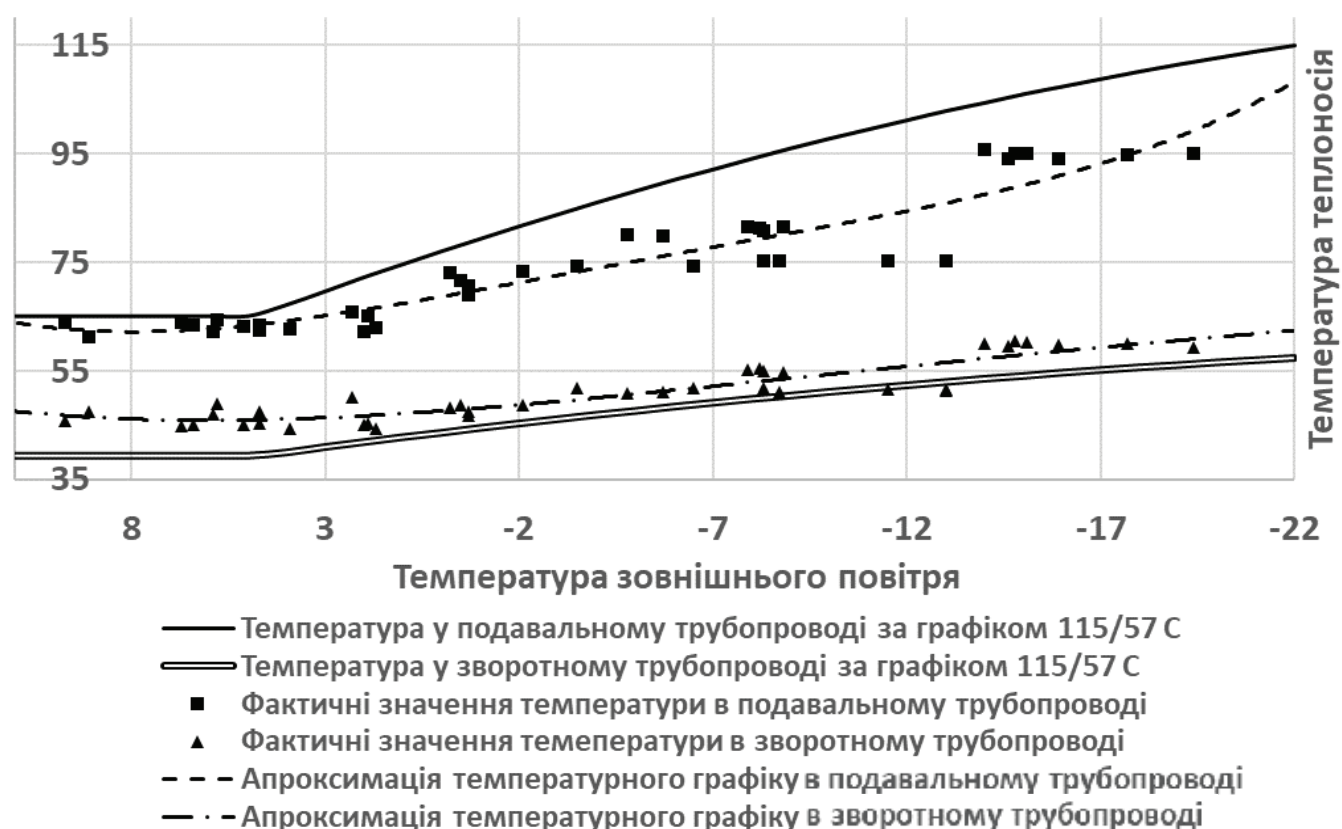


Рис. 2. Невідповідність реальних умов роботи теплових мереж температурному графіку 115/57 °C.

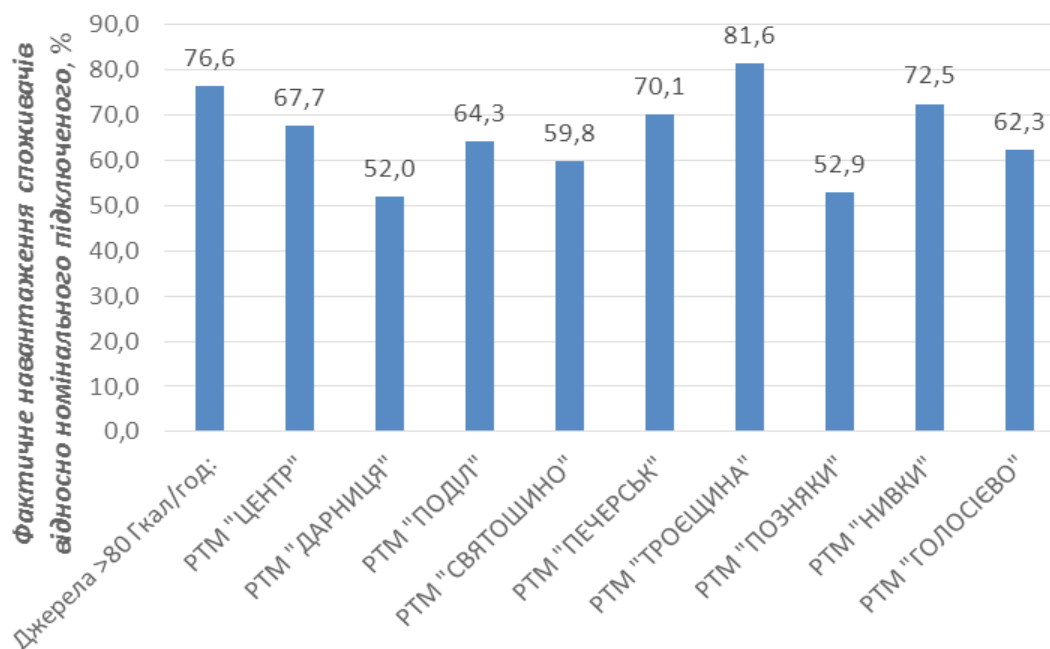


Рис. 3. Фактичне навантаження споживачів відносно номінального підключеного.

З урахуванням вищенаведених факторів у роботі було розраховано та запропоновано до впровадження температурний графік 115/70 °С. Розрахунки показали, що такий графік у змозі забезпечити кількість теплоти, адекватну потребі споживачів, а також є значно ближчим до реальних умов роботи теплових мереж, як показано на рис. 4.

Такий температурний графік є доцільним для використання з економічної точки зору, тому що зумовлює можливість зниження питомих втрат теплоти з погонного метра теплових мереж. Однак впровадження зниженого температурного графіку потребує відповідної зміни загальних вимог при виданні "Технічних умов" на приєднання до систем теплопостачання, необхідності зміни значень температурного графіку у інших документах, наприклад, генеральному плані міста, а також можливості зміни розрахункових теплових навантажень в укладених договорах на теплопостачання споживачів. Тем не менш, корегування температурного графіку міст доцільно розглядати як один з можливих заходів з підвищення енергоефективності роботи систем теплопостачання.

Використання твердих побутових відходів для виробництва теплової енергії

В останні роки з метою заміщення використання природного газу активно впроваджуються альтернативні джерела енергії.

Одним з шляхів часткового заміщення природного газу в комунальній теплоенергетиці великих міст України є використання твердих побутових відходів (ТПВ), енергетичний потенціал яких активно використовується багатьма країнами світу для виробництва теплової та електричної енергії.

В ЄС в 2014 р. працювало 483 ТЕЦ-на-ТПВ, в яких за рік спалювалось біля 90 млн. т ТПВ з виробництвом 60,9 млн. МВт·год теплової енергії, та 30,6 млн. МВт·год електричної енергії. Сукупний прибуток від ТЕЦ-на-ТПВ в світі в 2016 р. склав ~13,6 млрд. дол. США. Такі підходи до системи поводження з ТПВ в ЄС відповідають рамковій Директиві 2008/98/ЄС про відходи [5] та новій Директиві ЄС 2018/851 [6], яка її змінила 30 травня 2018 р.

В умовах енергетичної кризи в Україні використання енергетичного потенціалу ТПВ для виробництва

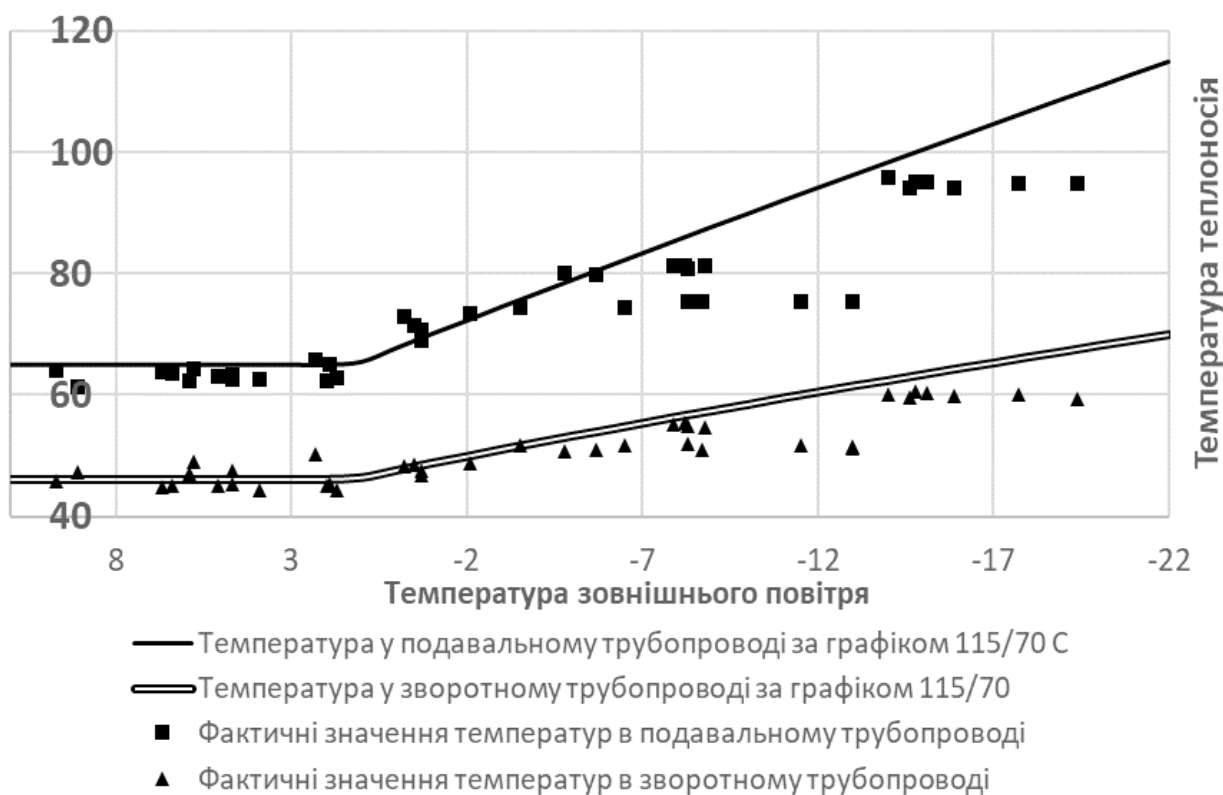


Рис. 4. Відповідність фактичних режимів роботи теплових мереж температурному графіку 115/70 °С.

теплової енергії з метою теплопостачання населенню, тим більш з урахуванням дефіциту місця для складування ТПВ, є надзвичайно актуальним [7]. Однак доцільність впровадження ТЕЦ-на-ТПВ у населеному пункті потребує аналізу поточного та перспективного обсягу утворення ТПВ та їх морфологічного складу, а також дослідження теплотворної здатності та вологості змішаних ТПВ, тобто визначення кількості теплоти, яку можна отримати при їх спалюванні [8].

Єдиний в Україні функціонуючий сміттєспалювальний завод «Енергія» розташований в м. Києві. Завод працює в режимі котельні, здійснюючи підігрів зворотного теплоносія районної котельні «Позняки», яка забезпечує теплом та гарячою водою населення однойменного житлового масиву. В планах заводу – встановлення турбіни на 3,5 МВт, тобто переведення в режим ТЕЦ. В роботах авторів експериментально визначено, що усереднена кількість теплоти, яка виділяється при спалюванні ТПВ м. Києва, складає 1550...1700 ккал/кг, в залежності від сезонності та вологості ТПВ (морфологічний склад і вологість ТПВ були визначені ДП «НДКТІ міського господарства»).

Аналіз морфологічного складу ТПВ міст України показав, що особливістю ТПВ є висока частка в них низькокалорійних високовологих харчових біовідходів.

В сучасних умовах України вологі біовідходи (харчові відходи) складають 35...50 % морфологічного складу ТПВ, що в рази більше, ніж частка інших компонентів. Організація окремого збору харчових біовідходів та їх вилучення призведе до суттєвого підвищення калорійності залишку змішаних ТПВ та зниженню їх вологості.

Іншим шляхом заміщення природного газу в комунальній теплоенергетиці є використання місцевого твердого палива. На цей час спостерігається широкомасштабне впровадження твердопаливних котлів. Однак необхідно враховувати, що для відповідності викидів в атмосферне повітря від твердопаливних котлів екологічним нормативам України (Наказу Мінприроди України від 22.10.2008 № 541) [9], а тим більш для виконання екологічних зобов'язань України відповідно до Угоди про асоціацію України та ЄС, зокрема жорсткіших вимог Директиви 2010/75/ЄС [10] для великих спалювальних установок потужністю більше 50 МВт, та потенційно Директиви 2015/2193 [11] для спалювальних установок середньої потужності – від 1 до 50 МВт, ці викиди повинні бути очищені від наднормативних концентрацій оксидів азоту, оксидів сірки та твердих частинок (пилу).



а)



б)

Рис.5. Пило-золовловлювачі: а) – відцентровий фільтр, б) – циклонний пиловловлювач.

Очищення викидів в атмосферне повітря

Автори протягом більше 30 років займаються розробкою та впровадженням в промисловість різних технічних рішень, технологій і апаратів очищення димових і технологічних газів від оксидів азоту, оксидів сірки та твердих частинок.

Зокрема, в останні роки розроблені високоефективні пило-золовловлювачі: відцентровий фільтр та циклонний пиловловлювач (рис. 5) [12, 13]. Потреба у створенні таких апаратів була викликана низькою ефективністю роботи стандартного пиловловлюючого обладнання, та встановленням більш жорстких нормативів на викиди.

Конструкція розробленого відцентрового фільтра заснована на використанні системи каналів із замкненими контурами, що дозволяє в 2...5 разів скоротити викиди твердих частинок в атмосферу в порівнянні з типовими відцентровими пиловловлювачами.

Основні переваги відцентрового фільтра:

- суха система пилоочищення;
- ефективність уловлювання пилу у відцентровому фільтрі – 90...98 %.
- відсутність змінних витратних фільтруючих елементів;
- простота конструкції і надійність в експлуатації.

Робота циклонного пиловловлювача заснована на двоступеневому очищенні. Перша ступінь - відцентрове очищення висококонцентрованого потоку в пристінній області апарату з відведенням твердих частинок крізь жалюзійний елемент в окремий бункер-пилосбірник. Друга ступінь – відцентрове очищення в циліндричній і конічній частинах циклонного пиловловлювача.

Основні переваги циклонного пиловловлювача:

- винесення частинок пилу з циклонного пиловловлювача в 2...4 рази менше, ніж у стандартного циклона;
- збільшення терміну служби відносно стандартного циклона, що досягається відведенням насиченого твердими частинками пристінного потоку в окремий бункер-пилосбірник, в результаті чого досягається зменшення абразивного зносу корпусу апарату.
- ефективність уловлювання пилу у циклонному пиловловлювачі – 90...93 %.

На багатьох промислових підприємствах широко використовуються стандартні циклони, які з певних причин не задовольняють сучасним вимогам щодо якості очищення газових потоків від твердих частинок. Авторами розроблений метод маловитратної модернізації таких пиловловлювачів. Модернізація існуючих циклонів типів ЦН, СІОТ, ЛІОТ, РІСІ, тощо дає змогу зменшити

винос пилу в 2...4 рази без зростання енерговитрат на очищення, і також збільшити термін експлуатації циклону в 1,2...1,4 рази.

Перспективним напрямком застосування відцентрових фільтрів є використання їх в системах комбінованого газоочищення від золи і оксидів сірки для твердопаливних котлів. В такий системі очищення димових газів від SO_2 здійснюється сухим способом, при цьому відцентровий фільтр, крім своєї безпосередньої функції, виступає в якості реактора, в якому відбувається зв'язування до 50 % SO_2 сорбентом (вапном).

Описані пило-золовловлювальні апарати вже застосовуються для сухого очищення продуктів спалювання від твердопаливних котлів, а також в різних галузях промисловості: металургійній, коксохімічній, паперовій, тощо. Зокрема, в цементній промисловості набули застосування відцентрові фільтри, які надають змогу збільшити продуктивність трубних кульових млинів за рахунок модернізації системи аспірації без збільшення енергоспоживання.

Висновки

1. Розроблено нові конструктиви водотрубних та водотрубно-димогарних котлів з покращеними техніко-економічними та екологічними характеристиками. Заміна застарілих котлів на розроблені сучасні дозволить в масштабі України отримати економічний ефект близько 100 тис. т у.п./рік. Скорочення викидів NO_x складе до 35 %.

2. Проведено аналіз реального теплового навантаження теплоджерел міста Києва з урахуванням проектного навантаження та кількості теплоти, що була відпущена споживачам та забезпечує комфортні умови життя. Розроблено новий температурний графік роботи теплових мереж 115/70 °С, який забезпечує кількість теплоти, що адекватна потребі споживачів, та є доцільним для використання в містах країни з економічної точки зору. Однак впровадження зниженого температурного графіку потребує відповідної зміни загальних вимог при виданні "Технічних умов" на приєднання до систем теплопостачання, зумовлює необхідність зміни значень температурного графіку у інших документах, наприклад, генеральному плані міста, а також можливу потребу зміни розрахункових теплових навантажень в укладених договорах на теплопостачання споживачів. Тем не менш, корегування температурного графіка роботи тепломереж міст доцільно розглядати як один з можливих заходів з підвищення енергоефективності роботи систем теплопостачання.

3. Доведена доцільність часткового заміщення природного газу в комунальній теплоенергетиці великих міст України твердими побутовими відходами. Визначені шляхи підвищення ефективності спалювання змішаних ТПВ в умовах України, в тому числі вилучення за допомогою окремого збору «вологих» біовідходів із загальної маси змішаних ТПВ.

4. Для досягнення відповідності новим більш жорстким європейським екологічним нормативам, розроблені високоефективні апарати для очищення продуктів спалювання від твердих частинок та оксидів сірки. Ефективність очищення від пилу у відцентровому фільтрі – 90...98 %, у циклонному пиловловлювачі – 90...93 %. Ефективність сіркоочищення – до 50 %.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сігал О.І., Кучин Г.П., Скрипко В.Я., Бикоріз Є.Й. До розробки національної стратегії теплозабезпечення України // Сборник трудов: «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики» – К.: ИПЦ АЛКОН НАНУ. – 2010. – С.43-45.

2. Роговий В.Т., Сігал О.І. Освоєння серійного виробництва водогрійних водотрубних котлів в Україні // Сборник трудов: «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики» - К. ИПЦ АЛКОН НАНУ. – 2003. – С.29-36.

3. Роговий В.Т., Сігал О.І., Канигін О.В., Тузман Я.М., Олєфіренко А.П., Коваль Ю.Д. Конструкція та випробування дослідного зразка водогрійного водотрубного котла КВВ-1,0 Гн теплопродуктивністю 1,0 МВт // Сборник трудов: «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики» – К. ИПЦ АЛКОН НАНУ України. – 2010. – С.162-167.

4. Патент на винахід UA 70831 A F24H1/00 «Водогрійний котел» / Канигін В.Н., Сігал О.І. // Номер заявки 20031213004, дата подання заявки: 30.12.2003, бюлетень №10, 2004 р.

5. Директива 2008/98/ЄС про відходи та скасування деяких Директив: [https://menr.gov.ua/files/docs/2008%](https://menr.gov.ua/files/docs/2008%2098%20D0%84%D0%A1.pdf)

[2008%2098%20D0%84%D0%A1.pdf](https://menr.gov.ua/files/docs/2008%2098%20D0%84%D0%A1.pdf)

6. Директива ЄС 2018/851, що змінює Директиву 2008/98/ЄС «Про відходи...»: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.150.01.0109.01.ENG

7. Павлюк Н.Ю., Сігал О.І. Підходи до проблеми поводження з твердими побутовими відходами в світі та в Україні // Промышленная теплотехника. – 2015. – №3. – С.74-81.

8. Павлюк Н.Ю. Оцінка кількості теплоти, що виділяється при спалюванні твердих побутових відходів // Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики».-2016, - К: ИПЦ АЛКОН НАНУ.– С. 205-208.

9. Наказ Міністрів України від 22.10.2008 № 541 «Про затвердження технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин із теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт»: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08>

10. Директива 2010/75/ЄС від 24.11.2010 про промислові викиди (інтегроване запобігання та контроль забруднення): <http://old.minjust.gov.ua/file/33301.docx>

11. Директива ЄС 2015/2193 від 25.11.2015 «Про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин в атмосферне повітря від середніх спалювальних установок»: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015L2193>

12. Патент на корисну модель UA 110464 U «Відцентровий фільтр з жалюзійною решіткою» / Плашихін С.В., Семенюк М.В. // Номер заявки u 201603659, дата подання заявки: 06.04.2016,., бюлетень №19, 10.10.2016.

13. Патент на винахід UA 104834 C2 «Циклофільтр» / Серебрянський Д.О., Плашихін С.В. // Номер заявки а 201306773, дата подання заявки: 30.05.2013, бюлетень №5, 11.03.2014.

REDUCTION OF NATURAL GAS CONSUMPTION AND REDUCTION OF HARMFUL EMISSIONS WITH COMBUSTION PRODUCTS IN MUNICIPAL HEAT SUPPLY

Sigal O.¹, candidate of Technical Sciences, **Paderno D.¹**,
candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Pavlyuk N.¹, candidate of Technical Sciences, **Safyants A.¹**,
candidate of Technical Sciences, **Bykoriz E.¹**, **Pashyhin S.²**,
candidate of Technical Sciences

¹*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of
Ukraine, M. Kapnist str, 2a, 03057, Kiev, Ukraine*

²*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute» 37, Peremoghy av., Kyiv,
03056, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.8>

The technical solutions are proposed to reduce the consumption of natural gas, as well as to reduce harmful emissions with combustion products in the municipal heat supply systems:

- New constructions of water-tube and water-fire-tube boilers with improved technical, economic and environmental characteristics have been developed. Replacing of the obsolete boilers with these boilers within Ukraine will provide effect of saving of about 100 thousand tons of fuel equivalent per year. NO_x reduction will be up to 35%;

- The new temperature mode for heating networks 115/70 °C has been developed, which provides the amount of heat that is adequate to the needs of consumers, and is appropriate for use in cities of the country from an economic point of view. However, the implementation of such reduced temperature mode requires a corresponding change in the general requirements when issuing "Technical Specifications" for connection to district heating systems, necessitates changes in the temperature mode values in other documents, for example the general plan of the city, as well as the possible need to change the calculated heat loads in concluded contracts for heat supply to consumers. Nevertheless, correction of the temperature modes of cities' heat networks should be considered as one of the possible measures to improve the energy efficiency of heat supply systems;

- The expediency of partial replacement of natural gas in the municipal heat supply systems of large cities of Ukraine with municipal solid waste (MSW) has been proved. The ways for improving the efficiency of mixed MSW combustion in conditions of country, including the

extraction of "wet" biowaste from the total mass of mixed MSW by using a separate collection, are determined;

- To achieve compliance with the new more stringent European environmental standards, the highly efficient devices for cleaning combustion products from particulate matter and sulfur oxides have been developed. The efficiency of dust removal in centrifugal filters is 90...98%, in cyclone dust collectors – 90...93 %. Desulfurization efficiency is up to 50 %.

Ref. 13, fig. 5.

Keywords: natural gas, centralized district heating systems, heat energy, boiler, municipal solid waste, gas cleaning, particulate matter, centrifugal filter, cyclone dust collector.

1. Sigal O., Kuchin G., Skrypko V., Bykoriz E. [To development of the national heat supply strategy of Ukraine] Proc.: [Problems of ecology and operation of energy objects], K.: IPC ALCON NASU, 2010, p. 43-46.

2. Rogovyj V., Sigal O. [Mastering of serial production of water-heating water-pipe boilers in Ukraine] Proc.: [Problems of ecology and operation of energy objects], K.: IPC ALCON NASU, 2003, p.29-36.

3. Rogovyj V., Sigal O., Kanygin O., Tuzman Y., Olefirenko A., Koval Y. [Design and testing of the prototype of the water-heating water-tube boiler KVB-1,0Gn with heat capacity of 1.0 MW] Proc.: [Problems of ecology and operation of energy objects], K.: IPC ALCON NASU, 2010, p.162-167.

4. Patent for invention UA #70831 A F24N1/00 "Hot water boiler" / Kanygin V., Sigal O. // Application No. 20031213004, Application Date: December 30, 2003, bulletin No. 10, 2004.

5. Directive 2008/98/EC of The European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>

6. Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.150.01.0109.01.ENG&toc=OJ:L:2018:150:TOC

7. Pavlyuk N., Sigal O. [Approaches to solid waste management in the world and in Ukraine] Industrial Heat Engineering, 2015, # 3, p.74-81.

8. Pavlyuk N. [Estimation of the amount of heat released during solid waste incineration] Proc.: [Problems of ecology and operation of energy objects], K.: IPC ALCON NASU, p. 205-208.

9. Order of the Ministry for Environmental Protection

of Ukraine dated 22.10.2008 No.541 ["On approval of technological norms for permitted emissions of pollutants from heat installations with nominal heat capacity more than 50 MW"].

10. *Directive 2010/75/EU* of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0075>

11. *Directive (EU) 2015/2193* of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015L2193>

12. *Patent for utility model* UA 110464 U «The centrifugal filter with a louvre grille» / Plashyhin S., Semenyuk M. // Application No. u 201603659, date of filing: 06.04.2016, bulletin No. 19, 10.10.2016.

13. *Patent for invention* UA #104834 C2 "Cyclofilter" / Serebryansky D., Plashyhin S. // Application No. a 201306773, date of application: 30.05.2013, Bulletin No. 5, 11.03.2014.

Отримано 26.04.2019

Received 26.04.2019

УДК 662.6.536.4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ РЕЧОВИН ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Демченко В.Г., канд. техн. наук, Фалько В.Ю.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2019.9>

Основна увага в цій статті приділена вивченню речовин, які потенційно підходять для низькотемпературного зберігання теплової енергії в мобільних акумуляторах. Розглянуті особливості впливу теплофізичних властивостей та термічної стійкості різних речовин на теплообмін, теплопровідність, термін експлуатації та час зарядки/розрядки акумулятора. Проведено аналіз особливостей властивостей речовин для їх подальшого практичного застосування. Висновки та рекомендації спрямовані на висвітлення розбіжностей в існуючих дослідженнях в цій сфері.

Основное внимание в этой статье уделено изучению веществ, которые потенциально могут быть использованы для низкотемпературного хранения тепловой энергии в мобильных аккумуляторах. Рассмотрены особенности влияния теплофизических свойств и термической устойчивости различных веществ на теплообмен, срок эксплуатации и время зарядки/разрядки аккумулятора. Проведен анализ особенностей свойств веществ для дальнейшего практического применения. Выводы и рекомендации направлены на освещение разногласий в существующих исследованиях в этой сфере.

This article focuses on the study of substances that are potentially suitable for low-temperature storage of thermal energy in mobile storages. The features of the influence of thermophysical properties and thermal stability of various substances on heat transfer, thermal conductivity, specific and latent heat, lifetime and battery charge/discharge time are considered. The analysis of the features of the properties of substances for their further practical application was carried out. Finally, the presented conclusions and recommendations are aimed at highlighting discrepancies in existing research in this area.

Бібл. 15, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: зберігання теплової енергії, мобільний теплоакумулятор, стійкість, теплоакумуляуюча речовина. T – температура, °C; ΔT – різниця температур, °C; $T_{пл}$ – температура плавлення, °C; c_p – питома теплоємність, кДж/кг·K; ρ – густина, кг/м³; λ – теплопровідність, Вт/м·K; h – ентальпія, кДж/кг; τ – час, хв. v – швидкість, м/хв.

TES – акумулятор теплової енергії;

M-TES – мобільні накопичувачі теплової енергії;

ДСО – дискретна система опалення;

TAM – теплоакумуляуючий матеріал;

PCM – матеріал з фазовим перетворенням;

LHTES – зберігання латентної теплової енергії.

Вступ

Питанню розробки альтернативної системи теплопостачання населених пунктів та окремих об'єктів присвячено багато наукових робіт. Останніми роками активно розробляється TES – технологія, яка використовується для балансування попиту і пропозиції енергії на опалювання або охолодження. Аналіз багатьох публікацій показує, що науковий інтерес дослідників направлений на обґрунтування можливості створення мобільних накопичувачів теплової енергії M-TES, що дозволить значно зменшити споживання енергії, задовольнити потреби в теплі для розподілених користувачів та інтегрувати M-TES в систему комбінованої генерації та утилізації скидної теплоти промислових підприємств [1, 2, 3].

Технічна доцільність системи транспортування відпрацьованого тепла детально досліджена в [4].

Авторами також розробляється система дискретно-

го теплопостачання ДСО на базі мобільних акумуляторів теплоти, можливість впровадження якої наведено в [5].

Основною проблемою, яка гальмує впровадження мобільного транспортування теплоти залишається відсутність надійної теплоакумуляуючої речовини, яка повинна відповідати наступним критеріям: відповідність вимогам санітарної і пожежної безпеки, низька вартість, компактність, низька корозійна активність, висока щільність зберігання теплоти та тривалий термін експлуатації.

Слід зазначити, що ці питання остаточно не вирішені та залишаються дуже актуальними. Велику кількість речовин, призначених для акумуляування теплоти, можна поділити на три великих групи, а саме TAM наукового дослідження та майбутнього розвитку, TAM перспективного впровадження та TAM для комерційного використання. Остання група на жаль дуже обмежена.

З метою вибору TAM для практичного використання

було проведено дослідні порівняння теплофізичних властивостей, часу акумуляції і віддачі теплоти та термічної стійкості антифризів, а саме водних розчинів повареної солі та бішофіту, озокериту, котрий за рядом показників виявляє ознаки кристалогідрату, та РСМ – тригідрату ацетату натрію, які на наш погляд найбільш доступні та придатні для низькотемпературного зберігання теплоти.

Особливості теплообміну та експериментальні випробування

Більшість дослідників відмічають, що якість теплообміну залежить від конструкції М-TES і точного вибору теплоакumuлюючого матеріалу [6].

На даний час існує велика кількість конструкцій акумуляторів для зберігання теплової енергії. На жаль такі системи не знаходять широкого вжитку. Основна причина полягає в тому, що ряд властивостей ТАМ робить тепловий акумулятор досить дорогим у виробництві та складним в експлуатації. Наприклад, при використанні акумулюючої речовини в якості теплоносія процес розрядки протікає набагато швидше, ніж процес зарядки акумулятора. Це пояснюється явищем стратифікації, яка призводить до того, що при прямому контакті ТАМ з контуром нагріву зарядка акумулятора протікає дуже повільно. Інтенсифікація теплообміну та регулювання температури й часу процесу зарядки/розрядки може бути отримано шляхом збільшення швидкості потоку теплоносія. В акумуляторах з розділенням контурів теплоносія та акумулюючої речовини зарядка і розрядка займає майже однаковий час, а швидкість потоку теплоносія практично не впливає на ці процеси. Крім того в одноконтурній системі циркуляції теплоносія TES демонструє кращий час проведення зарядки/розрядки, в порівнянні з багатоконтурною. Ці обставини були враховані авторами при створенні експериментального стенду. Загальний опис, вигляд та теплова схема експериментального стенду були наведені в роботі [7].

Стенд складається з електричного котла, кожухотрубного теплоізолизованого теплового акумулятора, контуру охолодження – радіатора опалення, циркуляційного насоса, арматури, теплового та електричного лічильників, концентратора вимірів з датчиками температури та тиску та комп'ютера. При проведенні експериментів лічильниками фіксується кількість теплової та електричної енергії термopарами – температура прямої та зворотної води. Регулювання температури і швидкості теплоносія здійснюються відповідними блоками управління, протік теплоносія – краном балансування. Теплоносієм (вода) нагрівався електричним котлом, передача теплоти акумулюючій речовині

здійснювалася крізь стінку спіральної оребреної труби. Швидкість проходження теплоносія можна змінювати в межах від 1,0 до 9,0 м/хв., але при проведенні серії експериментів, описаних в цій роботі, вона залишалася постійною і складала 1,0 м/хв.

Нагрів акумулюючих речовин відбувався до температури 90 °С, після чого котел відключали. В процесі зарядки/розрядки проводилися фіксація часу та зміни температури теплоносія й акумулюючої речовини при нагріві та охолодженні. Дані аналізували та знаходили теплофізичні показники розрахунковим методом. Вивчалися теплофізичні властивості та термічна стійкість обраних для дослідження зразків перспективних теплоакumuлюючих речовин.

Огляд досліджуваних теплоакumuлюючих речовин

Треба зазначити, що від типу речовини, що акумулює теплоту залежить конструкція М-TES. Більшість властивостей теплоакumuлюючих речовин і матеріалів достатньо добре вивчені та досліджені, їх детальний опис можна знайти в літературі [8, 9].

У цій роботі наведені результати експериментальних досліджень найбільш доступних речовин для М-TES, призначених для застосування в діапазоні температур від 0 до 100 °С. Наші попередні дослідження, показали, що найкращі показники щодо акумуляції теплоти притаманні воді, соляним водним розчинам та матеріалам з фазовим перетворенням. Найбільше поширення в теплоенергетиці отримали рідкі теплоносії та антифризи, які широко застосовуються в системах опалювання та охолодження. Вода – найбільш доступний і дешевий теплоносієм. При перепаді температур $\Delta T = 60$ °С (35...95 °С) вода акумулює приблизно 250 Мдж/м³. Це значення використовується як еталон для порівняння з іншими матеріалами TES.

Поліпшити теплоакumuляційні властивості води можливо зміною її щільності. Окрім того експлуатація М-TES припускає їх використання при низьких температурах довкілля, у зв'язку з чим було проведено вивчення теплофізичних властивостей води, насиченого водного розчину NaCl у співвідношенні 19 % солі та 81 % води, та водного розчину бішофіту MgCl₂·6H₂O у співвідношенні 20 % на 80 % та порівняння результатів інших дослідників [10].

Наступна велика та перспективна група – це матеріали з фазовим переходом (PCM), які поділяються на органічні (парафіни, жирні кислоти, складні ефіри, цукрові спирти, поліетиленгліколи та ін.) і неорганічні (гідрати солей і металів), а також евтектичні суміші неорганічних і/або органічних речовин [11, 12].

Органічні матеріали РСМ добре вивчені та широко застосовуються в промисловості. Зазвичай їх поділяють на парафіни та непарафіни. Парафін або парафінові воски відносяться до вуглеводнів з лінійним ланцюгом, що складається з n-алканів. Непарафіни зазвичай відносять до великої групи представленої в основному жирними кислотами, складними ефірами, цукровими спиртами, гліколем та інші. Їх характеризує конгруентне плавлення, яке протікає без розподілу фаз. Вони широко використовуються в якості РСМ завдяки їхнім властивостям: щільності накопичення теплоти (приблизно 200 кДж/кг і 150 МДж/м³), конгруентному плавленню, затвердінню при незначному переохолодженні, високій хімічній стабільності без фазової сегрегації, невеликій зміні об'єму, нетоксичності та доступності за ціною. Також вони не викликають корозії металів.

В системах теплопостачання широко використовуються матеріали, які застосовуються при робочих температурах до 120 °С. Це кристалогідрати неорганічних сполук і деякі органічні сполуки (парафіни, жирні кислоти). Для досліджень нами було обрано озокерит, який є продуктом нафтового походження. Він являє собою суміш твердих вуглеводнів парафінового ряду з більшою або меншою домішкою рідких, газоподібних вуглеводнів, що входять до складу нафти. Озокерит за своєю консистенцією нагадує віск, його колір залежить від кількості смол, що містяться в ньому. Озокерит має високу теплоємність і низьку теплопровідність. Густина – від 0,85 до 0,97, частіше 0,91...0,95, температура плавлення – від 58 до 100 °С, за звичай близько 62 °С. Хімічний склад озокериту наступний: віск – 69...80%,

парафін – 3...7 %, мінеральна олива – 1...2 %, нафтові смоли – 8...10 %, асфальтени – 0,5...5 %, механічні домішки 3...8 % [13].

Група солегідратів найбільш перспективна для розробки конкурентоспроможних теплоакуючих матеріалів. Гідрати солей – це неорганічні сполуки, що містять кристалізаційну воду. Вони мають вищу теплопровідність в порівнянні з органічними матеріалами для застосування при низьких і помірних температурах, орієнтовно вона складає 350 МДж/м³ і 0,5 Вт/м К, відповідно. Також вони негорючі й дешевші за парафіни. Селегідрати мають недоліки, які обмежують їх застосування, такі як низька термостійкість при тривалих періодах експлуатації, сегрегація фаз, переохолодження та корозійна активність. Для досліджень нами було обрано тригідрат ацетату натрію [14].

Кристалогідрати широко поширені в природі та стали об'єктом численних наукових досліджень. Вони мають відносно високі значення питомої теплоти плавлення й задовільні теплофізичні властивості, проте їх головним недоліком є нестабільність фізико-хімічних показників при багатократних циклах плавлення-кристалізації. Перехід в тверду фазу часто відбувається з переохолодженням, спостерігається розділення фаз і поступова зміна хімічного складу. Внаслідок цього кристалогідрати мають невеликий ресурс роботи. Переваги та недоліки органічного і неорганічного РСМ приведені в роботі [15].

Теплофізичні показники ТАМ добре вивчені, деякі данні наведені в таблиці 1.

Цикл-експерименти для тестування термічної

Табл. 1. Технічні показники акумуляційних речовин

Речовина	Температура плавлення, $T_{пл}, ^\circ\text{C}$	Густина, $\rho, \text{кг/м}^3$	Теплопровідність, $\lambda, \text{Вт/м К}$	Питома теплоємність, $c_p, \text{кДж/кг К}$	Ентальпія, $h, \text{кДж/кг}$
Вода H_2O при 20 °С	0,0	1000	0,6	4,19	334
$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ (19 % + 81 %)	-10,0	1163	0,57	3,4	283
Озокерит $\text{C}_{36}\text{H}_{74}$ до $\text{C}_{55}\text{H}_{112}$	66,0...68,0	930	0,38	2,1	189
Тригідрат ацетату	58,0	1450	0,6	2,79	226
Бішофіт $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ (20 % + 80 %)	-20,0	1250	0,54	3,2	132,3

стабільності РСМ, при повторному плавленні і кристалізації, виявили зниження прихованої теплоти та зміну температури фазового переходу під час циклування.

Результати та обговорення

Рисунок 1 узагальнює результати проведених досліджень циклів нагріву/охолодження п'яти теплоакуючих матеріалів. Конкретні результати надані на рис. 1 (а, б, в, г, д). Як можна бачити, матеріали зі зміною фаз (РСМ) більш привабливі для зберігання теплової енергії. Завдяки високій щільності та густині зберігання теплоти ці матеріали більш підходять для застосування у мобільному акумуляторі. Однак, проведені дослідження показали, що при зміні температури від 20 до 100 °С озокерит виявляє ознаки аморфної речовини (відсутній фазовий перехід), при цьому об'єм зразка в негерметичній ємності зменшується на 5...7 %. Слід зазначити, що кристалогідрати неорганічних сполук не втрачають свої властивості й термічну стабільність навіть після 1000...2000 теплових циклів.

Озокерит та подібні йому матеріали мають низьку теплопровідність ($\approx 0,2...0,38$ Вт/м К), що знижує швидкість теплообміну під час процесу плавлення і затвердіння. Низька теплопровідність може бути усунена шляхом введення в кристалогідрати неорганічних сполук а також структур з металевою матрицею, застосуванням металевих ребер теплообмінної поверхні і розробкою композиційних матеріалів на їх основі. Варто пам'ятати, що вони проявляють помірну займистість і можуть хімічно взаємодіяти з деякими пластмасами, особливо зі поліолефінами, що призводить до їх інфільтрації та розм'якшення. Враховуючи отримані експериментальні дані, використання озокериту можна вважати недоцільним.

В результаті експерименту виявлено, що тригідрат ацетату натрію, без наявності центрів кристалізації, може досить довго (кілька діб) знаходитися в стані переохолодженої рідини. При переході з рідкої фази у тверду зменшується його теплопровідність, що значно ускладнює конструкцію теплоакуючого. Після 20...30 циклів нагріву-охолодження речовина поступово втрачає свої властивості внаслідок зміни її хімічного складу. Тому використання тригідрату ацетату натрію можливе тільки після розв'язання питання стабілізації його хімічного складу протягом часу експлуатації. Деякі з вищевказаних недоліків тригідрату ацетату натрію, можуть бути усунені або значно зменшені. Одним з основних методів запобігання сегрегації та осадження є додавання загусників. Шляхом додавання полімерних або целюлозних гелеутворюючих матеріалів, таких як

дерев'яні волокна або аттапульгітові та палигорськітові глини, термін служби гідратів солей може бути збільшений до 1000 циклів за рахунок значного зменшення теплоакуючих властивостей. Інші методи засновані на додаванні до гідрату води в кількості, що трохи перевищує стехіометричне співвідношення при механічному перемішуванні суміші.

Ступінь переохолодження рідини при температурі нижче температури кристалізації, може бути зменшено за допомогою домішок, які прискорюють кристалізацію пересичених розчинів, таких як бура або вуглець, але вони знижують теплопровідність солегідратів. Що стосується корозійних властивостей сольових гідратів, то нержавіюча сталь сумісна з усіма солями, а вуглецеві сталі слабо схильні до корозії. Кольорові метали, особливо алюміній, мідь і латунь застосувати не рекомендується в наслідок активної хімічної і електрохімічної корозії. Для промислового застосування в системах опалення на сьогодні найбільш придатною є теплоакуюча речовина на основі води з домішкою антифризу.

Висновки

1) Таблиця 1 демонструє деякі протиріччя, які виникають при роботі з даними з літератури. Теплофізичні властивості ТАМ мають великі розбіжності в різних літературних джерелах. На властивості ТАМ впливає його якість та спосіб виготовлення. Це може призвести до помилок при проектуванні систем зберігання теплової енергії LHTES.

2) Аналіз результатів експерименту, наведених на рис. 1, показує, що нагрівання та охолодження теплоносія у всіх експериментах проходило в однакових умовах. Додавання солі NaCl та бішофіту до складу ТАМ практично не впливає на швидкість нагріву та охолодження теплоносія.

3) Додавання бішофіту погіршує теплофізичні властивості води та зменшує щільність акумуляції теплоти. Експериментально встановлено, що після 3...4 циклів нагріву/охолодження з розчину технічного бішофіту випадає темно-жовтий нерозчинний осад, що вимагає застосування додаткових фільтрів в системі циркуляції теплоносія та постійного їх обслуговування.

4) Суттєве підвищення часу розрядки TES отримано при випробуванні озокериту. Крім тригідрату ацетату натрію всі означені речовини показали стабільний стан після 30 циклів нагріву/охолодження.

5) Тригідрат ацетату натрію показує нестабільні результати при термоциклюванні і після 20-30 циклів нагрівання/охолодження поступово втрачає свої властивості.

6) Цикл-експерименти проведені для аналізу

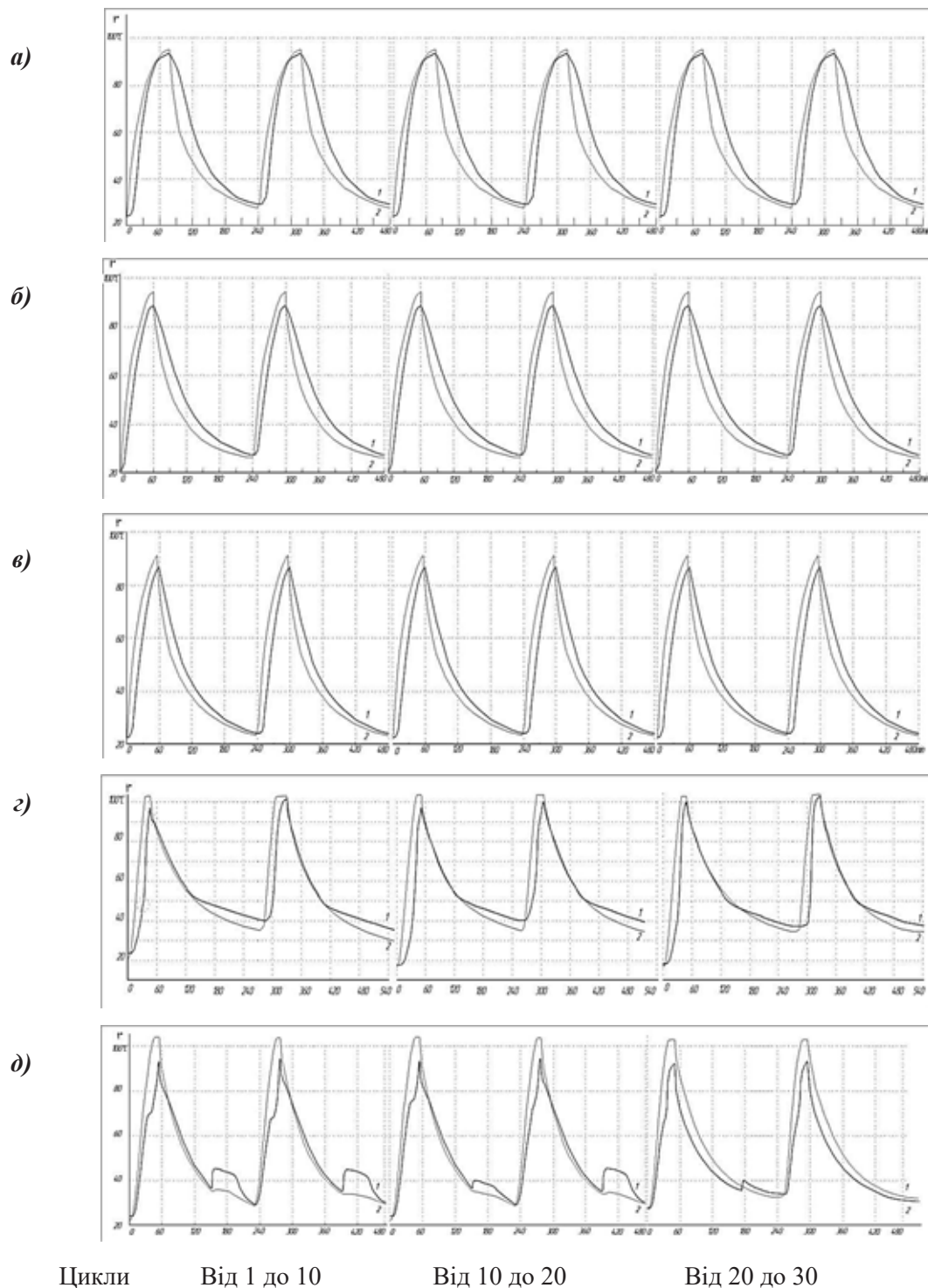


Рис. 1. Експерименти тестування термічної стабільності акумулюючих речовин:
а: вода (акумулювальний контур) – 1, вода (нагрівальний контур) – 2;
б: розчин NaCl – 1, вода – 2 (нагрівальний контур);
в: бішофіт – 1, вода – 2 (нагрівальний контур);
г: озокерит – 1 вода – 2 (нагрівальний контур);
д: тригідрат ацетату натрію – 1, вода – 2 (нагрівальний контур).

стабільності ТАМ показали, що висока щільність акумуляції енергії досягається при застосуванні речовин з фазовим переходом.

7) Теплові характеристики системи зберігання теплової енергії TES на базі PCM можуть бути підвищені шляхом застосування ефективної поверхні теплообміну та створенням нових композитних матеріалів.

8) З проведеного дослідження випливає, що температура теплоносія на вході має найбільший вплив на зарядку TES. Проте, збільшення швидкості вигідно лише тоді, коли температура теплоносія на вході вище температури фазового переходу PCM. Температура подачі теплоносія від TES до споживача повинна бути не нижча за 50 °C.

9) У випадку коли температура теплоносія на вході в акумулятор нижче температури ТАМ, ефект збільшення швидкості потоку пригнічується більш високим температурним потенціалом руху теплоносія і температурою зміни фази PCM.

10) За одиничною вартістю та способом накопичення енергії для промислового застосування в системах М-TES, на сьогодні, найбільш придатною є теплоакуюча речовина на основі води з домішкою антифризу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Storch G., Hauer A.* Economic efficiency of the system of distribution of thermal energy on the basis of mobile storage units: two examples; Proceedings of the Conference EKOSTIK; Stockton, NJ, USA. May 31 – June 2, 2006

2. *M. Deckert, R. Scholz, S. Binder, A. Hornung.* Economic efficiency of mobile latent heat storages, – Energy Procedia, 2014 – Elsevier, pp. 171–177

3. *Weilong Wang, Shaopeng Guo, Hailong Li, Jinyue Yan, Jun Zhao, Xun Li, Jing Ding.* Experimental study on the direct/indirect contact energy storage container in mobilized thermal energy system (M-TES), Applied Energy Volume 119, 2014, Pages 181–189

4. *Miró L., Gasia J., Cabeza L.F.* Thermal Power Storage (TES) Industrial Waste Heat Recovery (IWH): Review. Appl. Energy. 2016; 179: pp. 284–301

5. *Демченко В.Г, Трубачев А.С., Гронь С.С.* Оцінка впровадження дискретної системи опалення населеного пункту експрес-методом «3Е», Теплофізика та теплоенергетика, Том 41, № 1, 2019, С. 43–53

6. *Getu Hailu, Seasonal Solar. Thermal Energy Storage,* 2018 Reviewed, p. 22. DOI:10.5772/intechopen.79576

7. *Демченко В.Г, Фалько В.Ю., Гронь С.С.* Мобільні акумулятори для дискретних систем теплохолодопостачання. Частина 1, Пром. теплотехніка, 2018, Т. 40, № 2, С. 20–26, ISSN 56 0204-3602

8. *Tatsidjodoung P, Le Pierrès N, Luo, L.* (2013) A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. Renew. Sustain. Energy Rev. 18, pp. 327–349. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.025>

9. *Alva, G. Liu L. Huang X., Fang, G.* (2017) Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. Renew. Sustain. Energy Rev. 68, pp. 693–706. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.021

10. *ДСТУ ISO 2479-2001* Натрій хлористий технічний. Визначення вмісту речовини, нерозчинної у воді чи кислоті і приготування основних розчинів для інших визначень та ГОСТ 4209-77, Реактиви. Магній хлористий 6-водний. Технічні умови

11. *Pielichowska K., Pielichowski, K.* (2014) Phase change materials for thermal energy storage. Prog. Mater. Sci. 30, p.p. 67–123. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2014.03.005

12. *Thermal Energy Storage, Technology Brief, IEA-ETSAP and IRENA© Technology,* 2013, pp. 10–13

13. *Лазаренко Є. К., Винар О. М.* Мінералогічний словник, Київ. Наукова думка, 1975, С.774

14. *Й. Онейда, О. Швайка.* Глосарій термінів з хімії, Донецьк: Вебер, 2008, ISBN 978-966-335-206-0, С. 758

15. *J.Lizanaa, R. Chacarteguib, A. Barrios-Paduraa, J. M. Valverdec, C. Ortizc.* Identification of best available thermal energy storage compounds for low-to-moderate temperature storage applications in buildings, *Materiales de Construction*, Vol. 68, Issue 331, July–September 2018, p.160, ISSN-L:0465-2746, DOI:10.3989/mc.2018.10517

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THERMAL STABILITY OF SUBSTANCES FOR THERMAL ENERGY STORAGE

Demchenko V.G., Falco V.Yu.

Institute of Technical Thermophysics the National Academy of Sciences Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2019.9>

Optimizing the storage methods for excess heat energy and associated technical and technological solutions has a significant impact on the development of LHTES systems. New technologies for storing thermal energy are increasingly an alternative to the classic methods of providing thermal infrastructure facilities. In this paper we analyze the results of experimental studies of heat-storage materials for their further integration into the Smart Grid heating system of infrastructure objects and use in the M-TES. The conducted literary review showed that the thermophysical parameters of the investigated substances for the conservation of heat from different authors are very different. We conclude that this is due to the quality of the materials being studied and the errors of laboratory measurements. This negatively affects the design of LHTES systems and greatly complicates the calculation and modeling of heat transfer processes. It is especially important to correctly determine the amount of heat that can be obtained during the charging and discharge cycles of TES, as well as the lifetime of the material that accumulates heat. Therefore, the purpose of this work is to identify the appropriate material for energy storage applications between 0 °C and 115 °C and evaluate it, depending on the thermophysical properties and the time of stable operation. Taking into account the economic aspects, only the available technical materials are considered within the framework of this study, since the choice of material is aimed at the use of M-TES in real conditions of operation. Figure 1 summarizes the results of research on heating and cooling cycles of heats of heat storage substances. High thermal power and, hence, high thermal conductivity are important for the storage efficiency of PCM, especially in the process of solidification, because in a heat transfer predominant solid layer that grows continuously. However, both PCMs are not suitable for mobile thermal storage systems in this form. The huge disadvantages are the emergence of different values of the melting point, the high retention time of both candidates, as well as their prices. Therefore, further research should be directed to eliminate these negative effects. Despite the relatively low density of heat storage with aqueous solutions of antifreeze, they

are beneficial candidates for waste heat transfer systems within the framework of this study. Addition of NaCl salt practically does not affect the speed of heating and cooling of the coolant. The addition of bischofite worsens the thermophysical properties of water and shows a small density of heat accumulation. It has been experimentally established that after 3...4 cycles of heating and cooling from a solution of technical bischofite, a dark yellow, insoluble precipitate forms, which creates problems during the operation. Significant increase in TES discharge time was obtained when testing ozokerite. All of the above substances have shown a stable state after 30 cycles of heating / cooling and indicate overcooling below the melting point by about 30 °C. Trihydrate sodium acetate shows no stable results. Subsequently, after 20 cycles of heating and cooling, it loses its properties.

References 15, figures 1, table 1.

Keywords: storage of thermal energy, mobile heat storage, stability, heat-accumulating substance.

1. *Storch G., Hauer A.* Economic efficiency of the system of distribution of thermal energy on the basis of mobile storage units: two examples; Proceedings of the Conference EKOSTIK; Stockton, NJ, USA. May 31 – June 2, 2006

2. *M. Deckert, R. Scholz, S. Binder, A. Hornun.* Economic efficiency of mobile latent heat storages, – *Energy Procedia*, 2014 – Elsevier, pp. 171–177

3. *Weilong Wang, Shaopeng Guo, Hailong Li, Jinyue Yan, Jun Zhao, Xun Li, Jing Ding.* Experimental study on the direct/indirect contact energy storage container in mobilized thermal energy system (M-TES), *Applied Energy* Volume 119, 2014, pp. 181–189

4. *Miró L., Gasia J., Cabeza L.F.* Thermal Power Storage (TES) Industrial Waste Heat Recovery (IWH): Review. *Appl. Energy*. 2016; 179: pp. 284–301

5. *Demchenko V.G., Trubachev A.S., Hron S.S.* [Rating installation of the discrete heating system of the settlement using the express method 3e], *Prom. Teplotekhnika [Ind. Heat engineering]*, 2018, vol. 41, № 1, 2019, p. 43–53. (Ukr.).

6. *Getu Hailu, Seasonal Solar.* Thermal Energy Storage, 2018 Reviewed, p. 22. DOI:10.5772/intechopen.79576

7. *Demchenko V.G., Falco V.U., Hron S.S.* [Mobile accumulators for discrete systems of heat-supplying. Part 1.], *Prom. Teplotekhnika [Ind. Heat engineering]*, 2018, vol. 40. № 3, pp. 56– 68, ISSN 56 0204-3602, (Ukr.)

8. *Tatsidjodoung P., Le Pierrès N., Luo L.* (2013) A review of potential materials for thermal energy storage in

building applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18, pp. 327–349. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.025>

9. Alva G.; Liu L., Huang X., Fang G. (2017) Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 68, pp. 693–706. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.021

10. DSTU ISO 2479-2001 Sodium chloride technical. Determination of the substance content insoluble in water or acid and preparation of basic solutions for other definitions and GOST 4209-77, Reagents. GOST 4209-77 Magnesium chloride 6-water. Specifications (Ukr.)

11. Pielichowska K., Pielichowski K. (2014) Phase change materials for thermal energy storage. *Prog. Mater. Sci.* 30, pp. 67–123. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2014.03.005

12. *Thermal Energy Storage*, Technology Brief, IEA-ETSAP and IRENA© Technology, 2013, pp. 10–13

13. Lazarenko Ye.K., Vinar O.M. *Mineralogical Dictionary*, Kyiv, Naukova Dumka, 1975, p.774, (Ukr.)

14. Y. Opeida, O. Schwaika. *Glossary of Chemistry*, Donetsk: Weber, 2008, ISBN 978-966-335-206-0, p. 758, (Ukr.)

15. J. Lizanaa, R. Chacarteguib, A. Barrios-Paduraa, J. M. Valverdec, C. Ortizc. Identification of best available thermal energy storage compounds for low-to-moderate temperature storage applications in buildings, *Materials de Construction*, Vol. 68, Issue 331, July–September 2018, p. 160, ISSN-L:0465-2746, DOI:10.3989/mc.2018.10517

Отримано 26.04.2019

Received 26.04.2019

УДК 620.92

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДОВГОСТРОКОВОГО ПЛАНУВАННЯ У СЕКТОРІ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ УКРАЇНИ

Гелетуха Г.Г., канд. техн. наук, Желєзна Т.А., канд. техн. наук, Баштовий А.І., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова 2а, Київ 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.10>

Представлено поточний стан системи централізованого теплопостачання в Україні. Проаналізовано питання необхідності довгострокового планування у секторі теплопостачання. Представлено рекомендації щодо запровадження такого планування в Україні на державному та регіональному рівнях

Представлено текущее состояние системы централизованного теплоснабжения в Украине. Проанализирован вопрос необходимости долгосрочного планирования в секторе теплоснабжения. Представлены рекомендации по внедрению такого планирования в Украине на государственном и региональном уровнях.

The present state of the district heating system in Ukraine is presented. Necessity of long-term planning in the heat supply sector is analyzed. Recommendations for the implementation of such planning in Ukraine at the national and regional levels are presented.

Бібл. 6.

Ключові слова: теплопостачання, централізоване теплопостачання, довгострокове планування, схеми теплопостачання, стратегія теплопостачання..

АДЕ – альтернативні джерела енергії;
ТЕЦ – теплоелектроцентрально;
ЦТ – централізоване теплопостачання;

Нижні індекси:

т – тепловий;
е – електричний.

Актуальність роботи обумовлена нагальною необхідністю забезпечення високоефективного та надійного теплопостачання в Україні. **Метою** роботи є розробка рекомендацій для запровадження довгострокового планування у секторі теплопостачання. **Завдання** роботи полягають в огляді європейського досвіду в даній сфері, аналізі відповідного українського законодавства, визначенні напрямків для його удосконалення. **Методи дослідження** включають вивчення літературних, статистичних та інших даних, аналіз нормативно-правових актів.

Поточний стан сектору централізованого теплопостачання України

Протягом довгого періоду часу централізоване теплопостачання було основним способом опалення багатоквартирних житлових будинків в Україні і поки що залишається таким. Але останніми роками намітились стійкі негативні тенденції у цьому секторі. Частка ЦТ стабільно зменшується, і за останній час вона скоротилася з 60% у 2014 р. до 52% у 2017 р. Багато населених пунктів повністю відмовилось від систем ЦТ, перейшовши на індивідуальні чи автономні системи опалення. Стихійні відключення споживачів від систем ЦТ знижують їх ефективність і заважають адаптації до

поступового зниження теплового навантаження, що виникає після впровадження енергоефективних заходів в багатоквартирних будинках.

Негативний вплив цих обставин підсилюється постійним браком капітальних інвестицій для технічної модернізації, призводячи до низької ефективності систем ЦТ. За останні роки протяжність теплових мереж зменшилась на 8 тис. км. З 20 тис. км теплових мереж, що залишились, 38% знаходяться в поганому технічному та аварійному стані. Середні втрати теплової енергії у теплових мережах складають 19%. З 47 тис. котлів, що встановлені на підприємствах теплопостачання, щонайменше 20% мають термін експлуатації понад 20 років, що перевищує паспортний термін їх експлуатації. З кожним роком технічний стан систем теплопостачання погіршується, якість послуг знижується, а борги в секторі зростають.

Економічний стан підприємств ЦТ також погіршується. Грошові потоки регулюються адміністративним способом через банківські рахунки зі спеціальним режимом використання. Реформа тарифоутворення у сфері ЦТ відстає від нагальних потреб.

Нескладно спрогнозувати, що якщо ці негативні тенденції продовжаться і надалі, ми повністю залиши-

мось без систем ЦТ, а одночасно і без можливостей теплопостачання по конкурентним цінам і більш екологічно безпечним шляхом. При цьому будь-яких офіційних державних рішень про згортання або ліквідацію систем ЦТ і перехід на індивідуальне опалення також не існує.

Очевидно, що за таких невизначених обставин неможливо очікувати якихось значних інвестицій у даний сектор. Вважаємо, що для виправлення ситуації держава має чітко визначити політику, спрямовану на збереження та розвиток ЦТ, шляхом запровадження довгострокового планування в цьому секторі.

Ще одним негативним фактором для потенційних інвесторів є труднощі з підключенням нових будинків до теплових мереж. Проблема включає складну адміністративну процедуру такого приєднання і неприйнятно високу плату за нього. Необхідно розібратися, за якою методикою проводяться розрахунки вартості такого підключення і чому сьогодні ця вартість є дуже високою. Велика ймовірність того, що методика розрахунку є застарілою і вимагає оновлення.

На сьогодні довгострокове планування в секторі теплопостачання України практично відсутнє. Ситуацію потрібно терміново змінювати, оскільки таке планування обов'язково потрібне з огляду на ряд важливих факторів, серед яких створення сприятливого інвестиційного клімату. Для прийняття рішення про капіталовкладення у будь-який сектор, інвестор повинен чітко розуміти перспективи розвитку цього сектору. Що стосується централізованого теплопостачання, то його подальша доля в Україні є наразі невизначеною, і такою ж невизначеною є державна політика у цій сфері.

Досвід довгострокового планування систем теплопостачання в Євросоюзі

Вивчення європейського досвіду показує, що у ряді країн ЄС муніципалітети відіграють головну роль у процесі довгострокового планування систем теплопостачання. Вихідним пунктом для такого планування є генеральний та детальний плани території. Результат планування – зонування території із визначенням видів теплопостачання, у тому числі ЦТ. Такий підхід застосовується, наприклад, у Польщі, Данії, Литві. У цьому випадку процеси планування і зонування тісно пов'язані із сектором будівництва і ґрунтуються на певних нормативно-правових актах [1].

У Данії органи місцевого самоврядування несуть відповідальність за місцеве планування теплопостачання для житлових будинків. Місцеві органи влади приймають кінцеве рішення відносно того, як має відбуватися планування теплопостачання та який

проект теплопостачання може бути реалізований на певній території. Міське планування теплопостачання є обов'язковим і регулюється Законом про теплопостачання, дія якого поширюється на використання установок потужністю більше 250 кВт_т та ТЕЦ потужністю до 25 МВт_т. Відповідно до закону, загальними цілями планування теплопостачання є «сприяння найбільш соціально-економічному, в тому числі екологічно чистому, використанню енергії для опалення та гарячого водопостачання, а також у межах цієї мети зменшення впливу викопних палив на постачання енергії». Також метою є сприяння розвитку комбінованого виробництва теплової та електричної енергії.

У більшості країн ЄС (Данія, Швеція, Фінляндія, Польща, Литва, Естонія, Болгарія та ін.) плани по розбудові систем ЦТ чітко відповідають загальнодержавним цілям з розвитку енергетики, зафіксованим у національних стратегічних документах. Це забезпечує узгодженість і координованість дій на державному і місцевому рівнях. Наприклад, в Данії муніципалітет має право зобов'язати теплопостачальну компанію притримуватися дуже конкретних технічних та часових показників при розбудові певної системи теплопостачання.

Планування теплопостачання на державному рівні

Планування у сфері теплопостачання повинно відбуватися на двох рівнях – загальнодержавному (концепції, стратегії, державні програми) і регіональному (документи на рівні міста, теплопостачальної організації). При цьому обов'язково потрібно забезпечити узгодженість цільових показників документів цих двох рівнів та законодавчу підтримку процесу довгострокового планування ЦТ.

У 2017 році в Україні було прийнято Концепцію реалізації державної політики у сфері теплопостачання [2]. На сьогодні це практично єдиний документ, який можна умовно віднести до такого, що відображає стратегічне планування даного сектору. В Концепції доволі критично і повно описано проблеми, які існують в секторі теплопостачання України, а також запропоновано ряд шляхів і способів розв'язання цих проблем. Але, на нашу думку, у документі спостерігається розрив між метою і засобами її реалізації. Запропоновані основні принципи та способи реалізації державної політики у сфері теплопостачання є актуальними і необхідними, але у той же час декларативними і недостатніми для вирішення всіх проблемних питань, що на сьогодні сформувалися у сфері теплопостачання.

Концепція розроблена фактично тільки для систем

централізованого і автономного теплопостачання. Зі сфери її дії виключені системи індивідуального опалення та системи постачання тепла для власних потреб у промисловості. Відповідно, для цих сфер відсутній стратегічний державний документ, що визначає основи державної політики теплопостачання.

Основний недолік Концепції вбачаємо у тому, що вона не ставить в якості пріоритету збереження і розвиток систем ЦТ, пропонуючи «оптимальне поєднання» різних видів теплопостачання. При цьому якихось кількісних орієнтирів щодо цього «оптимального поєднання» документ не визначає. Таким чином, повна зупинка ЦТ і перехід на автономні і індивідуальні системи опалення також може кимось вважатися «оптимальним поєднанням».

Крім того, Концепція не враховує факт, що системи ЦТ знаходяться у досить жорсткій конкуренції з системами автономного і індивідуального теплопостачання і на сьогодні програють цю конкуренцію з економічної точки зору. Не запропоновано об'єктивних показників, на основі яких можуть прийматись рішення про доцільність відмови від централізованого теплопостачання, а також конкретних шляхів виходу з цієї ситуації.

Майбутнє систем ЦТ, що використовують тільки природний газ, видається безперспективним. Такі системи програють і прогнозовано будуть програвати конкуренцію індивідуальним системам опалення на газі, що вестиме до подальшого зменшення частки ЦТ та ще більшої залежності від природного газу. Вбачаємо єдиний стратегічний вихід для існування систем ЦТ у тому, що вони повинні генерувати теплову енергію суттєво (на 20-40%) дешевше, ніж індивідуальні системи теплопостачання на газі.

Планування теплопостачання на регіональному рівні

На сьогодні в Україні чи не єдиним видом документу регіонального (міського) рівня у сфері теплозабезпечення є схеми теплопостачання [3]. Проблема полягає у тому, що наразі схеми теплопостачання не мають статусу документів, обов'язкових для виконання, і не відносяться до містобудівної документації. З іншого боку, реалізація інвестиційних програм підприємств теплопостачання має здійснюватися на основі розроблених, погоджених та затверджених схем теплопостачання населених пунктів.

Задекларований у Концепції реалізації державної політики у сфері теплопостачання принцип «оптимального поєднання систем централізованого, помірно-централізованого, децентралізованого та автономного

опалення у схемах теплопостачання населених пунктів України» розглядається як такий, що має виходити з конкретної ситуації, яка склалася у населеному пункті на момент розробки схеми теплопостачання. Але поточна ситуація у ЦТ більшості населених пунктів складається таким чином, що споживачі від'єднуються від мереж ЦТ (в основному, окремими будинками, але інколи і поквартирно), внаслідок чого навантаження знижується, а, відповідно, питомі втрати теплової енергії при її транспортуванні (на одиницю корисно спожитого тепла) зростають.

В результаті, в залежності від обраних критеріїв «оптимальності» поєднання різних видів опалення, деякі райони населених пунктів, де раніше централізоване теплопостачання вважалось пріоритетним, можуть потрапити в розряд таких, де має реалізовуватися автономне чи навіть індивідуальне опалення. Це, в свою чергу, в подальшому робить неможливим впровадження у таких районах когенераційних технологій або теплової генерації на базі альтернативних джерел енергії. Обидва зазначених напрямки передбачають своє впровадження у системах ЦТ, і є, як правило, ефективнішими для тепло- і електрогенеруючих установок більшого масштабу.

Схеми теплопостачання мають розглядатися також як основа для подальшої розбудови та розвитку систем теплозабезпечення, що передбачає модернізацію джерел теплопостачання і закриття неефективних джерел, укрупнення шляхом об'єднання тепломереж сусідніх котельних, впровадження теплогенеруючих потужностей на альтернативних видах палива та енергії тощо. Надалі виконання цих завдань має здійснюватися підприємствами теплопостачання.

До складу таких систем можуть включатись діючі котельні промислових підприємств та інші джерела енергії, що вже існують на час розробки чи перегляду схеми теплопостачання. Але така практика планування не враховує можливість появи нових незалежних виробників тепла, що побудують теплогенеруючі потужності за власні кошти з метою ведення бізнесу у цій сфері. Відбір на конкурсних засадах нових теплогенеруючих об'єктів хоч і передбачений у Законі України «Про теплопостачання» [4], але лише у випадку збільшення обсягів теплоспоживання і з-поміж тих проектів, що вже були призначені до будівництва згідно існуючої схеми «на перспективу». Таким чином, «приватна ініціатива» з впровадження теплогенеруючих потужностей залишається поза увагою при розробці та плануванні схем теплопостачання населених пунктів.

Важливим є питання, як цілі з загальнодержавних концепцій, стратегій і програм попадуть в схеми те-

поставляння, на основі яких власне і розвиваються конкретні системи теплозабезпечення. Наразі ми не знаходимо ані в Концепції, ані в інших державних документах відповідного механізму. Вбачаємо у схемах теплопостачання більш технічний документ, розробку якого більше контролює міське комунальне теплопостачальне підприємство. Таке підприємство не завжди зацікавлене у встановленні фактично для себе ж відповідних амбітних цілей з частки ЦТ, тепла з АДЕ та від ТЕЦ, скидного тепла технологічних процесів, а також цілей зі зменшення втрат у мережах.

Пропозиції по впровадженню довгострокового планування у секторі теплопостачання на державному рівні

Враховуючи частку споживання палив і енергії, що припадає на сектор теплопостачання України (біля 50%), та його економічне та соціальне значення для економіки країни, вважаємо за необхідне розробку більш ґрунтовного документа, ніж існуюча Концепція реалізації державної політики у сфері теплопостачання, обсяг якої становить всього 4,5 сторінки. Таким документом має бути Стратегія теплопостачання до 2035 року, побудована за принципом Енергетичної стратегії України [5]. Стратегія теплопостачання повинна розглядати усі сектори, включаючи системи індивідуального опалення та системи постачання тепла для власних потреб у промисловості з урахуванням існуючих прогнозів на період до 2035 р. або 2050 р.

Для практичної реалізації задекларованого в Концепції принципу «оптимального поєднання систем централізованого, помірно-центрального, децентралізованого та автономного опалення у схемах теплопостачання населених пунктів України» потрібно розробити і впровадити обґрунтовані критерії оптимальності поєднання різних видів теплозабезпечення.

Вважаємо за необхідне ввести на рівні законодавства України, у тому числі у майбутній Стратегії теплопостачання, визначення терміну «ефективне централізоване теплопостачання», що відповідає Директиві 2012/27/ЄС «Про енергоефективність» [6] і задекларувати мету збільшення частки таких систем у ЦТ. У Директиві 2012/27/ЄС визначено, що «ефективне централізоване теплопостачання і охолодження» – це система централізованого теплопостачання або охолодження, що використовує мінімум 50% відновлюваної енергії, 50% скидного тепла, 75% тепла від когенерації або 50% комбінації такої енергії та тепла.

Крім того, в Стратегії теплопостачання обов'язково повинні з'явитися наступні кількісні цільові показники

з термінами їх досягнення: частка ЦТ, частка ефективних систем ЦТ, рівень об'єднання дефрагментованих теплових мереж міста в одну мережу, частка тепла з альтернативних джерел енергії, від ТЕЦ і когенерації (у тому числі із застосуванням АДЕ), частка використання скидного тепла, вторинних енергоресурсів, низькопотенційних джерел енергії, рівень втрат тепла в мережах, а також рівень конкуренції постачальників теплової енергії.

Стратегія теплопостачання повинна супроводжуватися Планом дій з її реалізації, що включатиме конкретні заходи, відповідальних за їх виконання, строки виконання, індикатори виконання та очікувані результати.

Отже, для збереження централізованого теплопостачання держава повинна чітко задекларувати стратегічний напрямок на розвиток ефективних систем ЦТ. Така визначеність із стратегічними цілями сприятиме прозорості сектору, інвестиційній привабливості і довірі з боку потенційних інвесторів.

Пропозиції по впровадженню довгострокового планування у секторі теплопостачання на регіональному рівні

Вбачаємо необхідність включення у схеми теплопостачання цільових показників, перерахованих вище, і їх узгодження з Мінрегіоном для того, щоб цілі на державному рівні були адекватно відображені на рівні населених пунктів. Сума цільових показників регіональних (міських) схем теплопостачання повинна дорівнювати відповідним цифрам (цілям), зазначеним у загальнодержавних документах.

При розробці міських схем теплопостачання повинний бути запроваджений чіткий принцип зонування території. Мета полягає у тому, щоб запобігти надмірному інвестуванню в інфраструктуру, визначивши зони централізованого теплопостачання і зони автономного чи індивідуального теплопостачання. У зонах централізованого теплопостачання усі нові будівлі без виключень повинні приєднуватися до систем ЦТ, а від'єднання існуючих споживачів від систем ЦТ у цих зонах має бути заборонено.

На сьогодні, згідно законодавства, відключення від мереж ЦТ знаходиться у компетенції органів місцевого самоврядування, які повинні сприяти оптимальному розвитку місцевих систем теплопостачання. Однак, органи місцевого самоврядування своїм рішенням можуть дозволити окремим власникам квартир (не цілим житловим будинкам) відключитися від ЦТ (всі інші технічні вимоги все ще залишаються в дії), в результаті чого місцеве теплокомуненерго несе великі збитки.

Для того, щоб все міське планування було організовано компетентно та в рамках законодавства, Мінрегіон має розробити методики, які визначають основи та методи планування теплозабезпечення для місцевих рад. Ці методики будуть, не в останню чергу, сигналом інвесторам про зрозумілі та чітко визначені умови для можливих інвестицій. Для використання своїх переваг, ЦТ має бути базою енергозабезпечення у всіх густонаселених районах, де є потреба у високій щільності постачання теплової енергії.

Схеми теплопостачання населених пунктів повинні отримати статус обов'язкових для розробки та виконання на місцевому рівні. Крім того, необхідно запровадити положення, які вимагали б від розробників таких схем:

- узгодження із загальнодержавними цілями, встановленими у відповідних концепціях, стратегіях і програмах розвитку. Серед іншого, це включає обґрунтування для населеного пункту конкретних кількісних показників виконання поставлених цілей, що можуть бути досягнуті за існуючої ситуації, а також при впровадженні певних додаткових заходів, таких як об'єднання теплових мереж кількох котельних з метою більш широкого залучення джерел скидної теплоти, впровадження когенерації або виробництва теплової енергії з АДЕ;

- пріоритетного розгляду проектів з когенерації, залучення джерел скидної теплоти, низькопотенційних джерел енергії, виробництва теплової енергії з АДЕ;

- розгляду можливостей розширення зон ЦТ: об'єднання окремих теплових мереж, приєднання нових споживачів – нових будівель, або тих, що раніше від'єдналися від мереж ЦТ.

Висновки

На сьогодні в Україні фактично відсутні як загальнодержавні, так і регіональні стратегічні документи, що сприяють довгостроковому плануванню централізованого теплопостачання. Діюча Концепція реалізації державної політики у сфері теплопостачання має ряд недоліків і не може бути достатньою базою для реалізації планування на національному рівні. Міські схеми теплопостачання, що являють собою єдиний документ регіонального рівня у сфері теплозабезпечення, не є обов'язковими для виконання і не враховують цільові показники відповідних документів загальнодержавного рівня. Це має негативний вплив на інвестиційний клімат у секторі і запобігає притоку капіталовкладень. Нормативно-правові акти України, що регулюють відносини у сфері теплопостачання, потребують суттєвого доопрацювання та внесення до них

норм, що встановлюють порядок здійснення довгострокового планування у секторі ЦТ.

Наразі централізоване теплопостачання залишається найбільш ефективним видом теплозабезпечення і може реалізувати усі свої переваги при створенні належних умов. Вважаємо за доцільне зберегти ЦТ в Україні і розвивати ефективні системи ЦТ з метою довгострокового надійного і високоякісного забезпечення населення країни тепловою енергією. Першочергові кроки у цьому напрямку повинні включати розробку Стратегії теплопостачання до 2035 року, впровадження принципу зонування при розробці схем теплопостачання і надання їм статусу обов'язкових для виконання. Крім того, необхідно забезпечити узгодженість цільових показників, включених до регіональних (міських) схем теплопостачання, з відповідними національними цілями. Потребує вирішення і проблема спрощення і здешевлення підключення нових будинків до теплових мереж.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Зарубіжний досвід розвитку систем централізованого та автономного тепло- та електропостачання.* ДП «НЕК Укренерго», 2016
<https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/5.-TSentralizovane-ta-avtonomne-teplozabezpechennya.pdf>
2. *Концепція реалізації державної політики у сфері теплопостачання.* Схвалено розпорядженням КМУ № 569-р від 18.08.2017 <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/569-2017-%D1%80>
3. *Порядок погодження* Мінрегіоном схем теплопостачання населених пунктів з кількістю жителів більш як 20 тисяч осіб та регіональних програм модернізації систем теплопостачання. Наказ Мінрегіону № 403 від 08.08.2012 <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1474-12>
4. *Закон України «Про теплопостачання»* (2633-IV від 02.06.2005, із змінами)
<http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15>
5. *Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність».* Схвалено Розпорядженням КМУ від 18.08.2017 № 605-р
<http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=250250456>
6. *Directive 2012/27/EU on energy efficiency*
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN>

PROBLEMS AND PROSPECTS OF LONG-TERM PLANNING IN THE HEAT SUPPLY SECTOR OF UKRAINE

Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I.

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine,
2a, Zhelyabova Str., Kyiv, 03057, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.10>

The purpose of the work is to develop recommendations for the implementation of long-term planning in Ukraine's heat supply sector. The tasks of the work consist in a review of European experience in this field, analysis of the relevant Ukrainian legislation, and determining directions for its improvement. The methods of research include the study of literary, statistical and other data, analysis of regulatory acts. It is shown that lately there have been stable negative trends in the district heating (DH) sector of Ukraine, while the state policy in this area is now uncertain. At present, in the country there are virtually no national and regional strategic documents that contribute to the long-term planning of district heating. The working Concept of implementation of the state policy in the field of heat supply has a number of shortcomings and cannot be a sufficient basis for the implementation of planning at the national level. City heat supply schemes, which are the only regional-level document in the field of heat supply, are not binding for realization and do not take into account the targets of relevant national-level documents. Normative legal acts of Ukraine that regulate relations in the field of heat supply, require considerable revision and introduction of the norms that establish the procedure for the implementation of long-term planning in the DH sector. It is advisable to keep district heating in Ukraine and develop efficient DH systems with the aim to provide the population of the country with reliable and high-quality heat supply. The first steps in this direction should include the development of the Heat Supply Strategy by 2035, implementation of the zoning principle while developing heat supply schemes and making the schemes mandatory for implementation. In addition, it is necessary to ensure the consistency of the target indicators included in the regional (city) heat supply schemes with the corresponding national targets.

References 6.

Keywords: heat supply, district heating, long-term planning, heat supply schemes, heat supply strategy.

1. *Zarubizhnyi dosvid rozvytku system tsentralizovanoho ta avtonomnoho teplo- ta elektropostachannia*. DP "NEK Ukrenenerho" [Foreign experience in the development of centralized and autonomous heat and power supply systems. SE "NEC Ukrenenergo"], 2016 (Ukr.)

<https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/5.-TSentralizovane-ta-avtonomne-teplozabezpechennya.pdf>

2. *Kontseptsiiia realizatsii derzhavnoi polityky u sferi teplopostachannia*. Skhvaleno rozporiadzhenniam KMU № 569-r vid 18.08.2017 [Concept of the realization of the state policy in the field of heat supply. Approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine Executive Order No. 569-r of 18.08.2017] (Ukr.) <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/569-2017-%D1%80>

3. *Poriadok pohodzhennia* Minrehionom skhem teplopostachannia naselenykh punktiv z kilkistiu zhyteliv bilsh yak 20 tysiach osib ta rehionalnykh prohram modernizatsii system teplopostachannia. Nakaz Minrehionu № 403 vid 08.08.2012 [Approval procedure for heat supply schemes of settlements with a population of more than 20 thousand people and regional programs for the modernization of heat supply systems by the Ministry for Regional Development, Building and Housing of Ukraine. Order of the Ministry for Regional Development, Building and Housing of Ukraine No. 403 of 08.08.2012] (Ukr.) <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1474-12>

4. *Zakon Ukrainy «Pro teplopostachannia»* (2633-IV vid 02.06.2005, iz zminamy) [The Law of Ukraine "On Heat Supply" (2633-IV of 02.06.2005, as amended)] (Ukr.) <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15>

5. *Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku* "Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist". Skhvaleno Rozporiadzhenniam KMU vid 18.08.2017 № 605-r [Energy Strategy of Ukraine until 2035 "Safety, energy efficiency, competitiveness". Approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine Executive Order No. 605-r of 18.08.2017] (Ukr.).

<http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=250250456>

6. *Directive 2012/27/EU on energy efficiency* <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN>

*Отримано 08.11.2018
Received 08.11.2018*

УДК 620.93

ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Пшинько А.Н., докт. техн. наук, Габринiec В.А., докт. техн. наук

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. акад. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2019.11>

Комплексно исследована возможность, условия и объем обеспечения эффективной работы систем теплоснабжения при переходе части теплогенерирующих мощностей на биотопливо с учетом стоимости его доставки. В качестве биотоплива предлагается применять отходы основных сельскохозяйственных культур, которые выращиваются в Приднепровском регионе.

Комплексно досліджено можливості, умови та обсяг забезпечення ефективної роботи систем теплопостачання при переході частини теплогенеруючих потужностей на біопаливо з урахуванням вартості його доставки. В якості біопалива пропонується застосовувати відходи основних сільськогосподарських культур, які вирощуються в Придніпровському регіоні.

The possibility, conditions and scope of ensuring the effective operation of heat supply systems during the transition of a part of heat generating capacities to biofuel, taking into account the cost of its delivery, has been comprehensively studied. As biofuels, it is proposed to use waste from major agricultural crops that are grown in the Dnieper region.

Библ. 10, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: биоресурс, сгорание биотоплива, система тепло- и горячего водоснабжения, теплотворная способность, стоимость перевозки.

f – КПД котельной;

K_w, K_b, K_c, K_s – доля посевных площадей области, которая занята под пшеницу, ячмень, кукурузу, подсолнечник;

M_i – масса собранного биотоплива, т;

$M(R)$ – масса собранной соломы в зависимости от радиуса сбора, т;

$N(R)$ – возможная мощность котельной в течение отопительного сезона в зависимости от расстояния, МВт;

N_w, N_b, N_c, N_s – незерновая часть урожая (НЧУ) пшеницы, ячменя, кукурузы и подсолнечника;

P_w, P_b, P_c, P_s – урожайности пшеницы, ячменя, кукурузы, подсолнечника, $T/\text{км}^2$;

R – радиус сбора биотоплива, км;

r_i – теплотворная способность конкретного вида биотоплива, Дж/кг;

S_c – стоимость покупки соломы, грн;

S_d – суммарная стоимость купленной и доставленной соломы, грн;

$S(R)$ – стоимость 1 тоннокилометра доставки биотоплива в зависимости от расстояния, грн;

T – длительность отопительного сезона;

W – влажность биотоплива, %.

Актуальность. Биоэнергетика была главным источником тепла и энергии для всего человечества на протяжении примерно 300 тысячелетий. С середины 19 века ее постепенно вытеснили такие источники энергии, как уголь, нефть, газ и атомная энергия. Однако, начиная с 1973 года человечество все большее внимания уделяет возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), среди которых биоэнергия занимает особое место. В первую очередь это связано с возможностью одновременно решать две наиболее важные проблемы человечества: продовольственную и энергетическую. Решение этих проблем связано с необходимостью системных исследований объемов и стоимости биоэнергии с позиций современных методологических подходов.

Анализ последних исследований и публикаций.

Перспективы развития и особенности использования биотоплива рассмотрены в работах [1,2,6,8]. Для анализа эффективности и оптимизации тепловых систем, использующих биотопливо, необходима разработка комплексных подходов, учитывающих специфику сельскохозяйственного производства в каждом конкретном регионе Украины с учетом стоимости его доставки, а также обоснованный выбор методики определения оптимальной мощности теплогенерирующего оборудования для каждого конкретного случая.

Цель работы. Целью работы является определение целевых показателей экономической целесообразности реализации перевода котельных на биотопливо с учетом

специфики и структуры сельскохозяйственного производства в регионе, стоимости покупки биоресурсов, стоимости их доставки к месту потребления и определению оптимальных объемов производства тепловой энергии с использованием биоресурсов.

Материал и метод исследования. Для разработки целевых показателей экономической целесообразности реализации перевода котельных на биотопливо использованы статистические данные относительно видов и масштабов производимой зерновой сельхозпродукции для Приднепровского региона с последующей оценкой возможности и масштабов энергии, которую можно получить при прямом сжигании отходов сельхозпродукции. Все результаты получены с использованием методов математического моделирования.

Результаты исследований. Преимущества биомассы как источника тепловой энергии определяются следующими важными факторами:

1. При энергетическом использовании биомассы тепличный эффект от сгорания углеродосодержащего топлива значительно снижается, поскольку углекислый газ будет постоянно изыматься из атмосферы для воспроизведения самой биомассы и не накапливаться там, как при использовании только традиционных источников энергии.

2. Ресурсы биомассы являются неограниченными, так как она является возобновляемым источником энергии.

3. Биомасса имеет преимущества с точки зрения использования отходов после ее утилизации. Зола после сгорания может вноситься в почву в качестве удобрения.

4. Закупки отходов позволит поднять доход фермеров и будут стимулировать бережное отношение к этим отходам.

В настоящей работе рассматривается только метод получения энергии из биомассы, основанный на пря-

мом ее сжигании. Это позволяет получить быструю окупаемость проекта в течении 3...5 лет. В случае использования зеленого тарифа срок окупаемости может существенно сократиться. В работе рассчитываются энергетические возможности при использовании сельскохозяйственного биотоплива, получаемого из отходов культур, выращиваемых конкретно в Днепропетровской области. Эта область расположена в центре Украины и структура ее посевных площадей и вид сельскохозяйственных культур примерно отражают среднестатистические энергетические показатели для такого биотоплива применительно для всей Украины. Поэтому результаты полученные в данной работе можно распространять на всю территорию Украины.

Энергетические возможности сельскохозяйственных культур. Для расчета энергетических возможностей сельскохозяйственных культур используют так называемую массу незерновой части урожая (НЧУ), которую можно использовать в качестве топлива. НЧУ для кукурузы являются стебли, корзинки, стержни початков, для пшеницы, ячменя и ржи – это солома, для подсолнечника – лузга, жмых, стебель, листья, корзинка.

Структура посевных площадей Днепропетровской области в 2016 году под основные культуры, их урожайности и НЧУ [3,4] приведены в таблице 1. Для дальнейших расчетов мы будем использовать только отходы таких сельскохозяйственных культур, как пшеница, ячмень, кукуруза и подсолнечник, как наиболее высокоурожайных и к тому же занимающих максимальные посевные площади.

Энергетические возможности биотоплива определяются его теплотворной способностью. На эту способность существенное влияние оказывает влажность самого биотоплива. В свою очередь влажность зависит от сроков уборки той или иной культуры. Для подсолнечника после его уборки современными комбайна-

Таблица 1. Структура посевных площадей Днепропетровской области в 2016 году под основные сельхозкультуры

Культура	Посевная площадь, га	Урожайность	Доля в % от общей посевной площади	Отношение НЧУ к зерну
Пшеница	456276	38,5 ц/га	24	1,1
Кукуруза	387486	56 ц/га	20	1,3
Ячмень	290524	31 ц/га	15,3	1,1
Подсолнечник	490146	22,4 ц/га	25,8	2
Рапс	53368	15 ц/га	2,8	1
Соя	9518	17,7 ц/га	0,5	0,9
Рожь	3349	19,5 ц/га	0,18	1

ми влажность перемолотой массы, куда входят стебли, листья и корзинки составляет порядка 20...30%. Для уменьшения влажности целесообразно уборку его производить в более поздние сроки. Необходимо принять во внимание и тот факт, что доля подсолнечника в общем балансе посевных площадей непрерывно увеличивается. Это характерно как для Днепропетровской области, так и для большинства областей южной и центральной Украины. Он, по сути, становится культурой номер один по величине занимаемой площади. Для кукурузы, которая, как видно из таблицы 2, имеет после подсолнечника самое высокое значение НЧУ, важны не только срок уборки, но и ее назначение. Это зерно или силос. Для энергетических целей можно использовать только отходы кукурузы после уборки ее на зерно. При этом также существуют варианты уборки: без обмолота початков и с их обмолотом, которые проходят в разные сроки. С обмолотом уборка проводится в более поздние сроки и поэтому отходы имеют меньшую естественную влажность. Эту влажность можно существенно уменьшить, если уборку переносить на более поздние сроки (декабрь-ноябрь) с 35% до 15%. ($Q=15...17$ МДж/кг) [2].

Вопрос влажности важен также при уборке пшеницы и ячменя. Сразу после уборки урожая этих культур влажность соломы составляет 15...20% (теплота сгорания $Q=12...15$ МДж/кг). Затягивать уборку зерновых, как это предлагается для подсолнечника и кукурузы, невозможно из-за осыпания зерна. Для зерновых при использовании соломы в энергетических целях лучше оставлять солому на поле для ее просушивания. Это снизит ее влажности до 14...17% ($Q = 14...15$ МДж/кг). Дополнительным позитивным побочным эффектом от такого подхода будет снижение вредного содержания

хлора в соломе. Так, для вымывания хлоридов из соломы необходимо 5...7 дней. Эти ингредиенты ведут к коррозионному разрушению металлических конструкций котлов. Экологические проблемы использования биотоплива рассмотрены в работе [10]. Виды и некоторые характеристики биотоплив растительного происхождения приведены в таблице 2.

Общим для всех видов биотоплива эффективным технологическим подходом, позволяющим решить самые значительные проблемы для биотоплива: влажность и малая плотность, является изготовление топливных гранул/пеллет. В процессе изготовления гранул можно существенно снизить влажность биотоплива при его измельчении при изготовлении гранул. Кроме того, использование гранул увеличивает плотность биотоплива до 1.2...1.4 кг/дм³, что в десятки раз превышает плотность исходного сырья. Это позволит в разы сократить стоимость перевозок биотоплива к месту потребления. К тому же сжигание биотоплива в виде пеллет позволит унифицировать как конструкцию самих котлов, так и конструкцию подающего пеллеты оборудования [5]. Такая унификация позволит снизить их стоимость. Это значительно увеличит преимущества использования биотоплива для энергетических нужд.

Энергетические и экономические показатели использования собранного биотоплива. Для расчета возможного количества собранного биотоплива на произвольной площади нужно учитывать урожайность культур, ее процентную долю в общей площади с/х культур и НЧУ. Из статистических данных для Днепропетровского региона доля посевной площади, урожайность, количество перспективного биотоплива с одного гектара и НЧУ приведены в таблице 1. В Днепропетровской

Таблица 2. Характеристики биотоплив растительного происхождения

Показатели	Свежая солома («желтая»)	Солома, хранившаяся на поле, («серая»)	Стебли кукурузы	Биомасса подсолнечника	Древесная щепа (для сравнения)
Влажность, %	10...20%	10...20%	45...60% (после сбора) 15...18% (сушеное на воздухе)	20...30%	40%
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	14,4	15	16,7 (с.в.), 5...8 (W 45...60%), 15...17 (W 15...18%)	16 ($W<16\%$)	10,4

области 63% земель занято посевными площадями. Это составляет для региона 968 тыс. га [7-8]. Доля посевной площади агрокультур, отходы которых можно использовать, как биотопливо, приведена в таблице 1. Условно, саму котельную будем рассматривать, как центр доставки биотоплива с любого направления. По оценке экспертов [6], а также на основании опыта ряда западных стран на энергетические нужды ежегодно Украина может использовать до 20% полученных отходов без каких-либо существенных последствий для плодородия почвы. Эту цифру мы будем использовать в дальнейших расчетах для всех агрокультур. Тогда потенциальное количество биотоплива в тоннах, которое можно получить для котельной с площади радиусом R , можно вычислить по соотношению:

$$M(R) = \int_0^{20} 2\pi R \cdot 0,63 \cdot 0,20 \cdot (P_w \cdot K_w \cdot N_w + P_b \cdot K_b \cdot N_b + P_c \cdot K_c \cdot N_c + P_s \cdot K_s \cdot N_s) \cdot dR, \quad (1)$$

где 0,2 — коэффициент, определяющий долю отходов, которую можно применять в качестве биотоплива, 0,63 — общая доля посевных площадей области, P_w, P_b, P_c, P_s — урожайности пшеницы, ячменя, кукурузы, подсолнечника, соответственно, K_w, K_b, K_c, K_s — доля посевных площадей области, которая занята под пшеницу, ячмень, кукурузу, подсолнечник. N_w, N_b, N_c, N_s — НЧУ

пшеницы, ячменя, кукурузы и подсолнечника. Результат подсчета массы собранного биотоплива по соотношению (1) приведен на рис. 1.

Энергетические возможности от применения различных видов биотоплива в Днепропетровской области рассчитывались по соотношению:

$$W_i = \int_0^{20} M_i(R) \cdot r_i \cdot dR, \quad (2)$$

W_i — количество энергии, которую можно получить от конкретного вида биотоплива, МДж, M_i — масса собранного биотоплива, т, r_i — теплотворная способность конкретного вида биотоплива, R — радиус сбора биотоплива. Результаты расчета по соотношению (2) приведены в графике рис. 2.

Из графика рисунка 2 видно, что наибольшим энергетическим потенциалом для Днепропетровской области при сжигании отходов обладает кукуруза. С одной стороны это связано с большой долей площадей занятых под эту культуру и ее высокой урожайностью, с другой стороны, у кукурузы достаточно высокое значение НЧУ.

Суммарное количество энергии, которое можно получить от всех вместе отходов с. / х. производства приведено на рисунке 3. Это количество рассчитывалось по соотношению:

$$W(R) = \sum W_i(R). \quad (3)$$

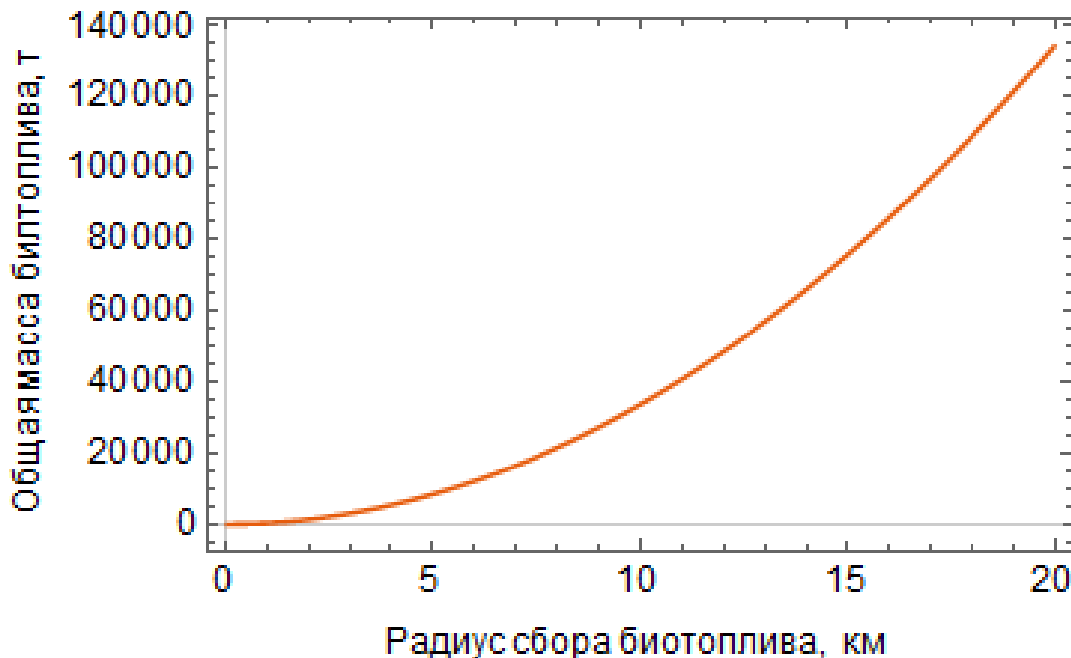


Рис. 1. Возможная масса биотоплива, которую можно собрать возле г. Днипро.

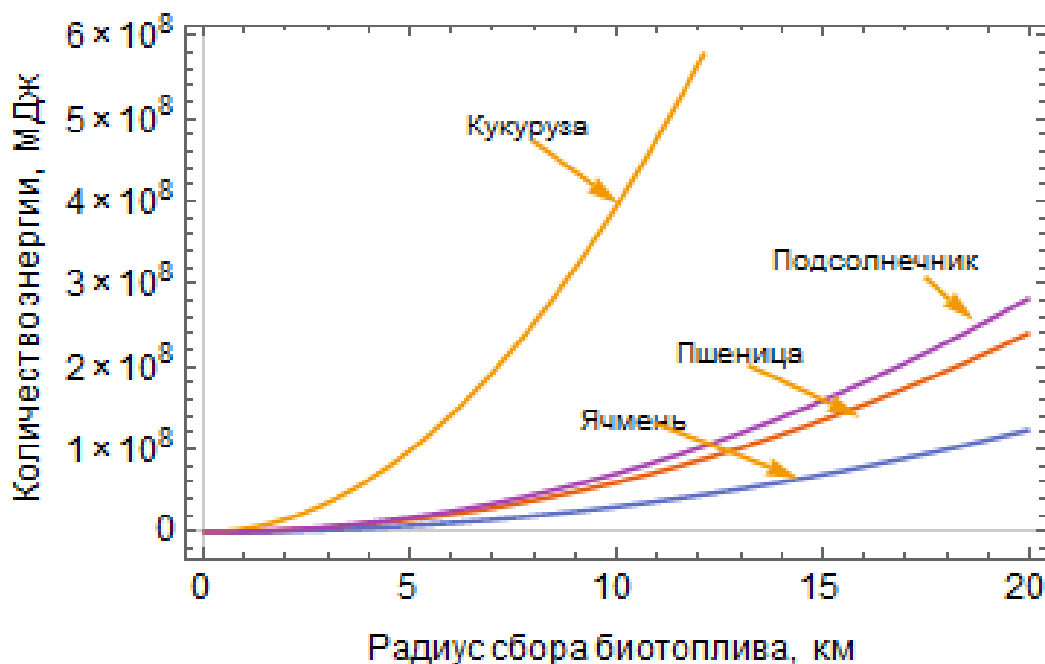


Рис. 2. Потенциальные возможности использования в качестве биотоплива отходов с/х культур для Днепропетровской области.

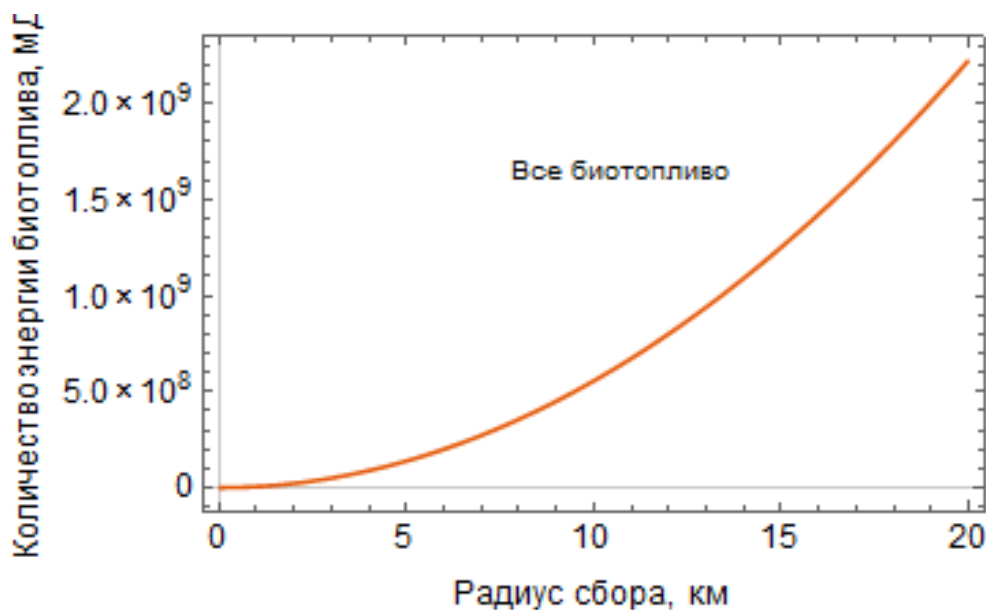


Рис. 3. Суммарное количество энергии, которое можно получить от всех вместе с/х отходов.

Результат расчета по соотношению (3) приведен на графике рисунка 3.

Возможная мощность котельной в условиях непрерывной работы в течение отопительного сезона (длится 175 дней), которую способно обеспечить собранное около г. Днипро с различной площади биотопливо при среднем КПД котельной, теплотворной способности,

приведенной в таблице 2, рассчитывалось по соотношению (4):

$$N(R) = \frac{W(R) \cdot f}{T}, \quad (4)$$

где f – КПД котельной, принимался равным 0,82, T – длительность отопительного сезона.

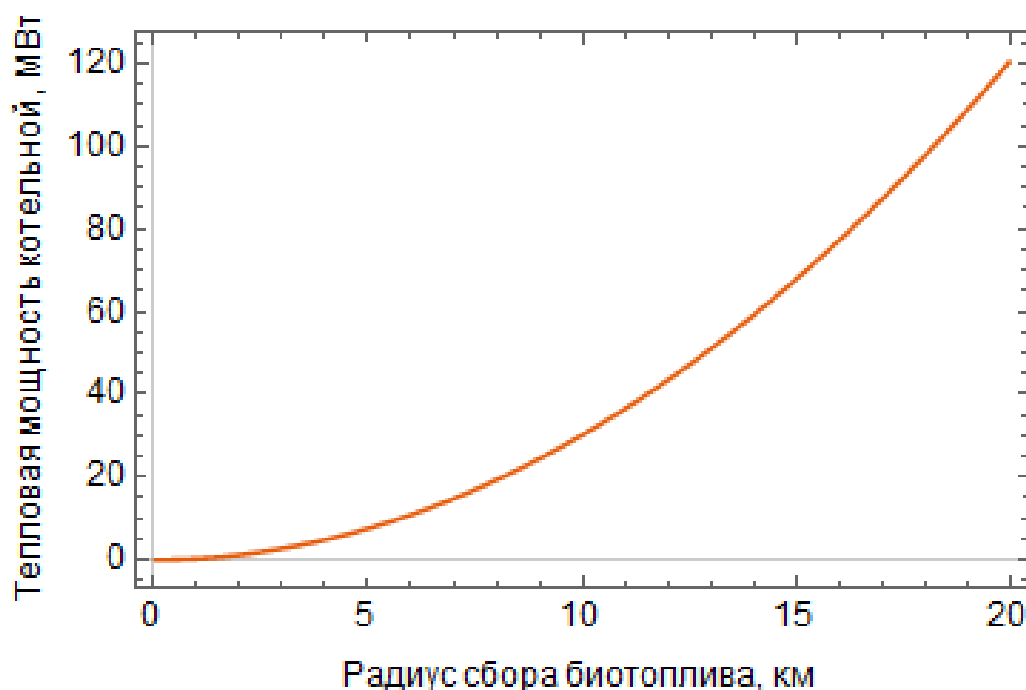


Рис. 4. Возможные значения мощности котельных, работающих на собранном в Днепропетровском регионе биотопливе.

Результат расчета по соотношению (4) приведен на графике рисунка 4.

Так, город Купянск в Харьковской области с населением 28 755 [1] человек обогревается от 15-ти газовых котельных с суммарной установленной мощностью 90 Гкал/час (104,67 МВт). Из графика рис. 4 видно, что для того чтобы обеспечить непрерывную работу этих котельных в течение отопительного сезона нужно собирать биотопливо в радиусе не больше 18 км. Количество населения, которое имеют большинство районных центров Днепропетровской области, колеблется в пределах 40...4 тысяч человек. Все котельные в них могут быть переведены на использование биотоплива вместо газа. Для всей Днепропетровской области, которая имеет площадь 31923 квадратных километров суммарная мощность таких котельных может составлять 2000...2100 МВт.

При переходе на биотопливо нужно учитывать не только его стоимость, но и стоимость перевозок. Эффективность транспортно-логистических операций является одним из ключевых факторов рентабельности заготовки биотоплива. Стоимость перевозок по Украине зависит от расстояния перевозки. Если аппроксимировать данные различных фирм относительно стоимости одного тоннокилометра в 2016 году квадратичной зави-

симостью, то получаем соотношение:

$$S(R) = 3,53214 - 0,0114295 R + 0,0000160748 R^2. \quad (5)$$

Для линейной зависимости имеем соотношение:

$$S(R) = 3,39517 - 0,0077453 R, \quad (6)$$

где $S(R)$ — стоимость одного тоннокилометров для 2016 года, R — расстояние перевозки груза.

Обработка статистических данных по стоимости одного тоннокилометров для 2016 года для линейной и квадратичной зависимостей приведена на рис. 5.

Если посчитать себестоимость тонны соломы с учетом всех затрат на приобретение, прессование в рулон и доставку, то получим результат в пределах от 250 до 1000 грн. [2,3]. Такой разрыв стоимости обусловлен качеством сырья, условиями доставки и сбора.

Сама стоимость четырех видов биотоплива для Украины составляет от 500 до 1500 грн. за тонну. Для наших расчетов возьмем среднюю стоимость — 1000 грн. за тонну. Это биотопливо нужно также доставить в котельную, поэтому надо принимать во внимание также стоимость доставки его для котельной. Общую стоимость купленного и доставленного в котельную биото-

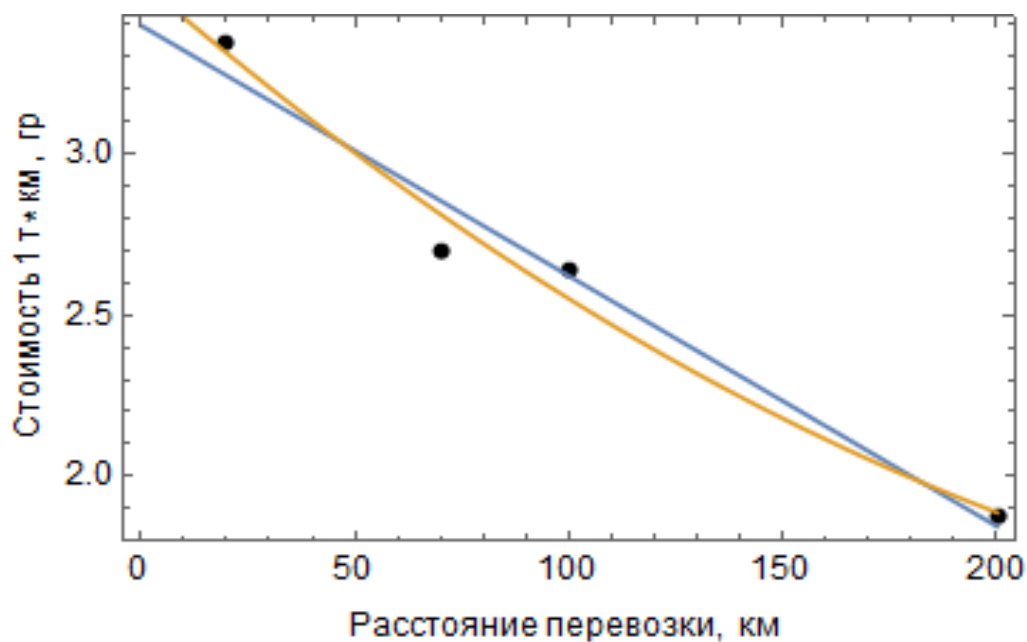


Рис. 5. Средняя стоимость перевозки грузов для Украины в 2016 году.

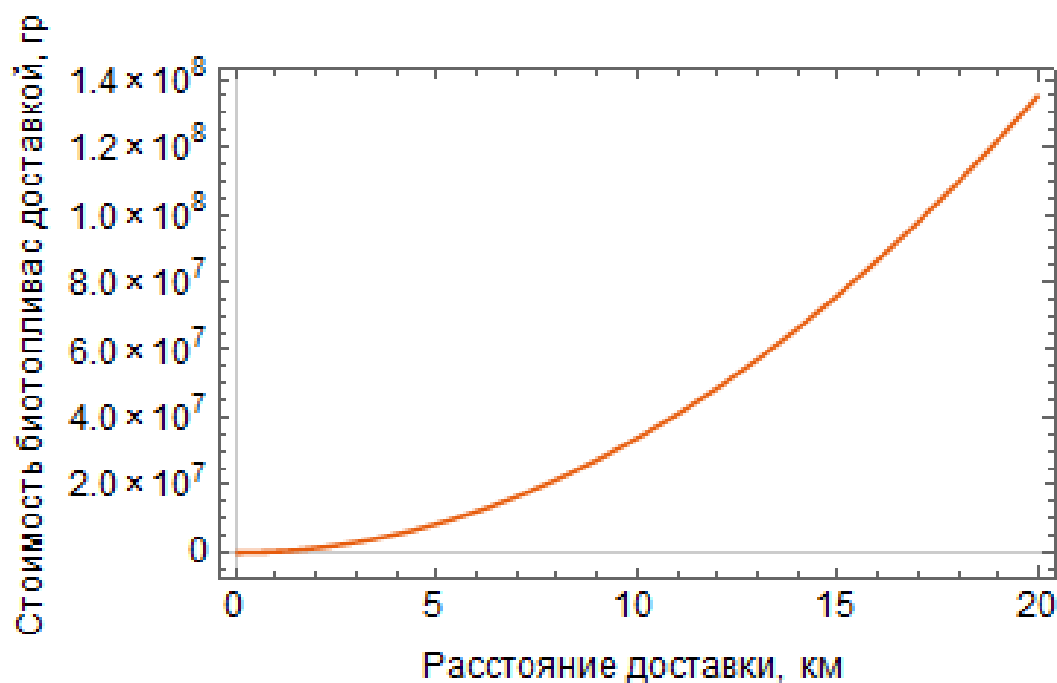


Рис. 6. Стоимость собранного биотоплива с учетом стоимостей покупки и доставки.

плива можна вычислить по формуле:

$$S_d = S_c \cdot M(R) + \int_0^R M(R) \cdot S(R) \cdot dR, \quad (7)$$

где S_d — суммарная стоимость купленной и доставлен-

ной соломы, грн; S_c — стоимость покупки соломы, грн; $S(R)$ — стоимость 1 тоннокилометра доставки биотоплива в зависимости от расстояния, грн; $M(R)$ — масса собранной соломы в зависимости от радиуса сбора, т; R — радиус сбора, км.

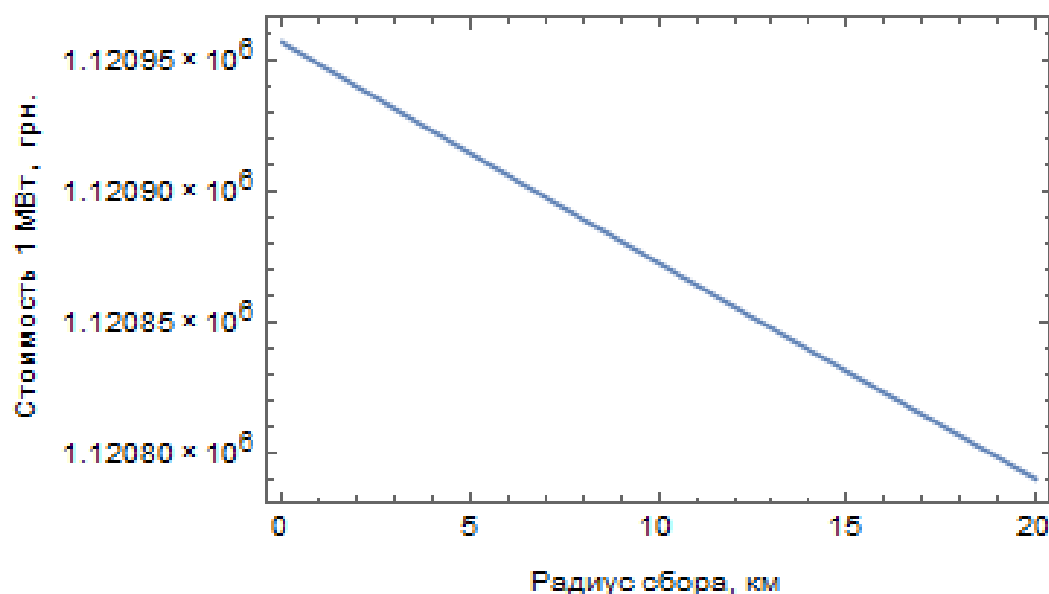


Рис. 7. Стоимость 1 МВт мощности котельной в зависимости от расстояния сбора биотоплива.

Расчет затрат на покупку и доставку соломы в котельную по соотношению (7) приведен на рис. 6.

Была также вычислена стоимость 1 МВт мощности котельной в зависимости от расстояния сбора соломы. Расчет осуществлялся по соотношению

$$S_1 = \frac{S_D}{N(R)}, \quad (8)$$

где $N(R)$ — возможная мощность котельной в условиях непрерывной работы в течение отопительного сезона в зависимости от расстояния.

Результат расчета по соотношению (8) приведен на рис. 7.

Для сравнения стоимость 1 МВт в течение отопительного сезона для газа по цене 9 600 гривен за 1000 м³ [5,7] будет равна $5,68976 \cdot 10^6$ гривен, то есть будет в пять раз дороже.

Выводы

Показана возможность перевода части мощностей котельных Днепропетровского региона на применение биотоплива. Такой перевод дает возможность обеспечить топливом 75...85% котельных, действующих в районных центрах области. При этом из сельскохозяйственного оборота для энергетических нужд будет изыматься только 20% отходов, что не скажется на самом обороте. Зола после сгорания биотоплива может использоваться в качестве удобрения. Показано, что для Днепропетровского региона наиболее энергоемкими являются отходы

кукурузы и подсолнечника, что связано с большой долей площадей занятых под эти культуры, их высокой урожайностью и достаточно высоким значением НЧУ. При существующем положении по себестоимости покупки и перевозок биотоплива себестоимость одного МВт тепловой мощности будет примерно в 5 раз ниже по сравнению с применением природного газа в качестве топлива. При росте мощностей котельной переход ее на биотопливо становится более рентабельным. Использование биотоплива в виде пеллет существенно повышает эффективность использования самого биотоплива и снижает стоимость его перевозки. Сжигание биотоплива в виде пеллет позволит унифицировать как конструкцию самих котлов, так и конструкцию подающего пеллеты оборудования. Окупаемость при применении биотоплива может составить 3...5 лет.

ЛІТЕРАТУРА

1. Никитин, Е. Е. Концептуальные вопросы модернизации теплообеспечения населенных пунктов Украины // Проблемы загальної енергетики : наук. зб. Нац. акад. наук України, Ін-т заг. енергетики. — Київ, 2012. — Вип. 2. — С. 5–11.
2. Гелетуша Г.Г., Железная Т.А., Кучерук П.П., Олейник Е.Н., Трибой А.В. Биоэнергетика в Украине: современное состояние и перспективы развития. Ч.1//Промышленная теплотехника.—2015— №2. Vol.37.— С.6–74.
3. <http://www.4sg.com.ua/ru/>

4. http://utem-bioenergy.com/ru/straw_potential.php
5. Никитин, Е. Е., Дутка А. В. Оценка технико-экономической эффективности комплексной термомодернизации централизованной систем теплоснабжения и зданий // Энергетика и ТЭК. – 2013. – № 9 (126). – С. 22–26.
6. Пшійнько О. М., Кузнєцов В. Г., Яценко Д. К., Габрінець В. О. Підвищення ефективності роботи системи тепlopостачання інфраструктури громадських будівель на прикладі ДНУЗТ // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 3 (63). – С. 97–107.
7. Дешко В. І., Шовколюк М. М., Шовколюк Ю. В., Дудніков С. М. Показники ефективності систем тепlopостачання // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.техн. зб. – Київ, 2012. – Вип. 16. – С. 182–192.
8. Пшійнько О. М., Габрінець В.О., Горячкін В.М. Аналіз ефективності системи тепlopостачання студмістечка Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 2 (50). – С.74–82.
9. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В. Перспективы выращивания и использования энергетических культур в Украине. Ч2//Промышленная теплотехника.–2015.– №5.Vol.37.–С.58–68.
10. Гелету́ха Г.Г., Железная Т.А. Дроздова О.И. Энергетический и экологический анализ технологий производства энергии из биомассы. Часть 2//Промышленная теплотехника.–2015– №2.Vol.37.– С.53– 63.

POTENTIAL OF USING AGRICULTURAL BIORESOURCES FOR RECEIVING HEAT ENERGY

Pshinko O., Habrinets V.

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, vul.

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2019.11>

The study analyze the possibility, conditions and scope of ensuring the effective operation of heat supply systems in the transition of some of the heat generating capacity to biofuel. It is proposed to use waste of the main agricultural crops that are grown in the Dnieper region as a biofuel. The main goal of the work is a scientific miscalculation of the possible mass of waste, their cost, including the cost of delivery. This mass is supposed to be used for combustion in order to obtain thermal energy. The work evaluates the cost of heat energy generated by burning waste. When calculating the cost, the logistics of the delivery itself are taken into account. The work identifies the possibilities of the Dnieper region to ensure the receipt and biofuel supply for the operation of the boiler house .. The cultures whose wastes are the most promising for use are identified . The cost parameters of cargo transportation in the territory of Ukraine in 2017, which depend on the distance, and also on the size trucks. These indicators, as well as indicators related to its purchase, are considered together with the energy potential of biofuel use as a source of thermal energy. The productivity of the main agricultural crops and the scale of their cultivation in the Dnieper region, the cost parameters of the purchase and transportation of waste from these crops make it possible and profitable to transfer a large proportion of the region's heat generating capacity to biofuel. The cost of a unit of thermal power can be reduced by a factor of five. For the first time, it was proposed to use new integrated approaches for estimating the cost parameters for heat generating thermal capacities when they are converted to the use of renewable regional bioresources. The authors also proposed a new logistics for the delivery of these sources to their place of application. From the technical and cost sides, the optimum scale of transfer of heat generating capacities to new renewable energy sources in a particular region is determined, depending on the structure of the sown areas and their productivity. The introduction of proposed solutions and approaches that ensure the use of renewable bioresources of energy can be realized with relatively small capital investments and can have a significant economic effect.

References 10, figures 7, table 2.

Keywords: bioresources, combustion of straw, heat and hot water supply system, heat losses, calorific value, cost of transportation.

1. Nikitin E. E. [Problems of general energy: a scientific collection]. National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of General Energy. Kyiv, 2012. Vip. 2. P. 5–11. [in Russian].

2. Geletuxa G.G., Zheleznaya T.A., Kucheruk P.P., Olejnik E.N., Triboj A.V. [Bioenergy in Ukraine: current state and development prospects. Part 1], Promyshlennaya teplotekhnika. [Industrial Heat Engineering], 2015. №2.Vol.37. P.68–74. [in Russian].

3. <http://www.4sg.com.ua/ru/>

4. http://utem-bioenergy.com/ru/straw_potential.php

5. Nikitin E.E., Dutka A.V. [Evaluation of technical and economic efficiency of integrated thermal modernization of centralized heat supply systems and buildings], Energetika i TEK.[Energy and Fuel and Energy Complex]. 2013. № 9 (126). P. 22–26. [in Russian].

6. Pshin'ko O.M., Kuznyeczov V.G., Yacenko D. K., Habrinets V. O. [Improvement of efficiency of the system of heat supply of infrastructure of public buildings on the example of DNVZT], Nauka ta progres transport [Science and transport progress]. 2016. № 3 (63). P. 97–107 (in Ukr.)

7. Deshko V.I., Shovkolyuk M.M., Shovkolyuk Yu.V., Dudnikov S. M. [Indicators of efficiency of heat supply systems]. Ventilyaciya, osvittleniya ta teplogazopostachannya: nauk. -texn. zb./ [Ventilation, lighting and heat and gas supply: scientific and technical collection], Kyiv. 2012. V. 16. P. 182–192 (in Ukr.)

8. Pshin'ko O.M., Habrinets V.O., Goryachkin V.M. [Analysis of the efficiency of the heat supply system of the campus of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport]/ Nauka ta progres transport [Science and transport progress]. 2014. № 2 (50). P.74–82 (in Ukr.)

9. Geletuxa G.G., Zheleznaya T.A., Triboj A.V. [Prospects for the cultivation and use of energy crops in Ukraine. Part 2], Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 2015. №5.Vol.37. P.58–68 (in Russian).

10. Geletuxa G.G., Zheleznaya T.A Drozdova O.I. [Energy and environmental analysis of biomass energy production technologies. Part 2], Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 2015. №2.Vol.37. P.53–63 (in Russian).

Отримано 05.02.2019

Received 05.02.2019

УДК 620.92

МОЖЛИВОСТІ ЗАГОТІВЛІ АГРОБІОМАСИ ТА ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВ З НЕЇ КОМУНАЛЬНИМИ ПІДПРИЄМСТВАМИ В УКРАЇНІ

Желєзна Т.А., канд. техн. наук, Драгнєв С.В., канд. техн. наук Баштовий А.І., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2019.12>

Представлено результати оцінки енергетичного потенціалу біомаси сільськогосподарського походження в Україні та поточного рівню його використання. Проаналізовано можливості створення комунальних підприємств по заготівлі агробіомаси та виробництву біопалива з неї. Показано результати типового техніко-економічного обґрунтування проектів з виробництва та використання палива з соломи.

Представлены результаты оценки энергетического потенциала биомассы сельскохозяйственного происхождения в Украине и текущего уровня его использования. Проанализированы возможности создания коммунальных предприятий по заготовке агrobiомассы и производству биотоплива из нее. Показаны результаты типичного технико-экономического обоснования проектов по производству и использованию топлива из соломы.

The results of estimation of the energy potential of biomass of agricultural origin in Ukraine and the current state of its use are presented. The possibilities for creation of communal enterprises for harvesting of agrobiomass and production of biofuels from it are analyzed. The results of the typical feasibility study of the projects for the production and use of straw fuel are shown.

Бібл. 8, табл. 6.

Ключові слова: біомаса, агробіомаса, потенціал біомаси, заготівля біомаси, біопаливо, комунальне підприємство.

ККД – коефіцієнт корисної дії;
КП – комунальне підприємство;
ОВБСН – обрізка та викорчовування багаторічних сільськогосподарських насаджень;
ПДВ – податок на додану вартість;

ТЕО – техніко-економічне обґрунтування;
IRR – внутрішня норма дохідності;
W – вологість;
н.е. – нафтовий еквівалент;
с/г – сільське господарство.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю заміщення дорогих викопних палив в Україні відновлюваними джерелами енергії, зокрема біомасою. **Метою** роботи є аналіз можливостей і розробка рекомендацій щодо створення комунальних підприємств по заготівлі біомаси та виробництву біопалива на базі об'єднаних територіальних громад. **Завдання** роботи полягають в оцінці потенціалу агробіомаси в Україні, визначенні перспективних напрямків діяльності зазначених комунальних підприємств, виконанні відповідних техніко-економічних обґрунтувань. **Методи дослідження** включають вивчення статистичних та інших даних, аналіз нормативно-правових актів, проведення розрахунків.

Потенціал агробіомаси в Україні та його використання для виробництва енергії

Біомаса аграрного походження залишається на сьогодні основною реальною складовою енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Це обумовлено такими чинниками як високий розвиток сільського господарства в країні, постійне вдосконалення систем сільськогосподарського виробництва, обмежені ресурси

доступної для енергетичних потреб деревної біомаси та порівняно повільний розвиток напрямку вирощування і використання енергетичних культур. Щодо останнього чинника, треба зазначити, що потенціал енергокультур в Україні також є значним (через наявність великих площ незадіяних сільськогосподарських земель), але має наразі, головним чином, віртуальний характер на відміну від пожнивних решток та інших видів агробіомаси.

За даними 2017 р., економічний потенціал відходів та побічної продукції сільського господарства, доступних для виробництва енергії, складає майже 9 млн. т н.е., що становить 43% загального потенціалу біомаси (20,9 млн. т н.е.). При цьому дані величини є стабільними протягом останніх років (табл. 1). Повне використання енергетичного потенціалу агробіомаси може задовольнити близько 18% кінцевого споживання енергії в Україні, яке у 2017 р. загалом склало 50,1 млн. т н.е. [1].

Важливо зазначити, що виконана оцінка економічного потенціалу агробіомаси (соломи зернових культур та ріпаку, побічних продуктів виробництва кукурудзи на зерно та соняшника) враховує інші напрямки використання цієї біомаси, включаючи власні потреби сільського господарства, зокрема такі як органічні

Табл. 1. Енергетичний потенціал біомаси в Україні (2017 р.)

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн. т	Потенціал, доступний для енергетики	
		Частка теоретичного потенціалу, %	млн. т н.е.
Солома зернових культур	35,6	30	3,65
Солома ріпаку	3,9	40	0,54
Побічні продукти виробництва кукурудзи на зерно (стебла, стрижні)	32,1	40	2,45
Побічні продукти виробництва соняшника (стебла, корзинки)	23,2	40	1,33
Вторинні відходи с/г (лушпиння соняшника)	2,4	100	0,99
Деревна біомаса (дрова, порубкові залишки, відходи деревообробки)	6,6	94	1,54
Деревна біомаса (сухостій, деревина із захисних лісосмуг, відходи ОВБСН)	8,8	44	1,01
Біодизель (з ріпаку)	-	-	0,31
Біоетанол (з кукурудзи і цукрового буряку)	-	-	0,59
Біогаз з відходів та побічної продукції агропромислового комплексу	1,6 млрд. м ³ CH ₄	50	0,68
Біогаз з полігонів твердих побутових відходів	0,6 млрд. м ³ CH ₄	34	0,18
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)	1,0 млрд. м ³ CH ₄	23	0,19
Енергетичні культури:			
- верба, тополя, міскантус (1 млн. га)*	11,5	100	4,88
- кукурудза (на біогаз) (1 млн. га)*	3,0 млрд. м ³ CH ₄	100	2,57
Всього	-	-	20,91
Всього первинні та вторинні відходи с/г (частка від загального потенціалу біомаси):			
2017 р.			8,96 (43%)
2016 р.			9,02 (43%)
2015 р.			8,12 (42%)
2014 р.			8,56 (40%)
2013 р.			8,53 (44%)

* передбачувана площа вирощування на незадіяних сільськогосподарських землях.

добрива у рослинництві та підстилка і корм у тваринництві. Тому обсяг біомаси, який можна залучити на виробництво енергії, в цілому визначається як 30-40% загального теоретичного потенціалу, що відповідає існуючій світовій практиці [2, 3]. При цьому для кожного конкретного господарства цей відсоток необхідно ретельно уточнювати, беручи до уваги повний спектр місцевих умов (врожайність культур, рівень розвитку

місцевого тваринництва, стан ґрунту та ін.). В результаті в реальних умовах частка потенціалу агробіомаси, доступної для енергетики, може коливатися від 0 до 100%. Крім того, вважаємо, що пожнивні рештки не повинні бути єдиним видом органічних добрив, які підтримують родючість ґрунтів в Україні. Необхідно також більш широко використовувати інші види органічних добрив, зокрема, гній, гноївку, пташиний послід, компо-

сти, зброджений субстрат з біогазових установок, зелене добриво, тощо. Також важливо повертати на поля золу від спалювання агробіомаси в енергетичних установках. Такі комплексні дії разом з раціональним веденням сільського господарства сприятимуть забезпеченню бездефіцитного балансу гумусу у ґрунтах.

Незважаючи на наявність великих ресурсів різних видів агробіомаси в Україні, їх практичне застосування для виробництва енергії розвивається недостатньо швидко. Наразі використання енергетичного потенціалу соломи складає лише близько 3%, стебел кукурудзи ще менше, а побічні продукти виробництва соняшника взагалі не використовуються з енергетичними цілями. Єдиним видом агробіомаси, енергетичний потенціал якого реалізується активно, є лущиння соняшника (табл. 2). Позитивною тенденцією останніх років можна назвати поступовий ріст виробництва брикетів з соломи і стебел кукурудзи [4].

Практичній реалізації потенціалу біомаси сільськогосподарського походження для виробництва енергії в Україні допоможе виконання міжнародного проекту «Сприяння впровадженню систем опалення на агробіомасі в сільських регіонах Європи» (AgroBioHeat). Проект розпочався у січні 2019 року за фінансуванням програмою досліджень та інновацій Європейського Союзу Горизонт 2020. Проект виконується консорціумом з 13 організацій з 9 країн Європи. Координатором проекту є грецький Центр досліджень та технологій Hellas (CERTH), а від України членом консорціуму є Біоенергетична асоціація України.

Можливості створення комунальних підприємств по заготівлі та переробці біомаси

Сьогодні в Україні активно розвиваються ідеї і практичні спроби створення біоенергетичних кооперативів і біоенергетичних селищ [5, 6]. Цікавими прикладами в даному напрямку є робота кооперативу з виробництва брикетів з соломи (с. Кінські Роздори, Запорізька обл.), брикетів зі стебел малини (с. Лосятин, Тернопільська обл.) [4], а також створення біоенергетичного кооперативу з вирощування енергетичних культур у с. Северинівка Вінницької обл., де місцевою громадою з 2007 року реалізується проект «Енергоефективне село». Питання створення біоенергетичного кооперативу і енергоефективного села проробляються також в Харківській області [7].

Треба зазначити, що фактично чинне законодавство України дозволяє створення енергетичних кооперативів, однак необхідне вдосконалення законодавства, оскільки спеціальне регулювання діяльності

енергетичних кооперативів відсутнє [8]. Тому наразі видається доцільним також розглянути можливості створення комунальних підприємств по заготівлі та переробці біомаси на базі об'єднаних територіальних громад. Функціонування таких КП може забезпечити місцеві громади новими робочими місцями, а також сприяти підвищенню добробуту населення, зменшенню залежності від викопних палив, розвитку підприємництва у регіоні та ін.

Перспективними напрямками роботи комунального підприємства можуть бути заготівля відходів сільського господарства, виробництво тріски з порубкових решток, вирощування енергетичних культур, заготівля деревного палива при відновленні та реконструкції захисних лісосмуг, виробництво гранул та брикетів з біомаси. Що стосується вибору одного конкретного виду діяльності потенційного КП або комбінації декількох напрямків, то, як показує закордонний досвід та досвід українських підприємств, однозначної рекомендації не існує, оскільки на кожній окремо взятій території, у кожній окремо взятій громаді існують унікальні місцеві умови, які і є точкою відліку для потенційної діяльності. На практиці найчастіше використовується підхід, описаний нижче.

Перш за все після підготовчого етапу, який включає в себе початковий аналіз місцевих умов, виділяються декілька основних потенційних видів діяльності. Наступний етап – проведення попередніх спрощених техніко-економічних обґрунтувань вибраних напрямків роботи. З урахуванням результатів цих ТЕО вибирається найпростіший, найзрозуміліший вид діяльності та обов'язково перевірені технології і надійне обладнання (що дуже важливо для українських реалій). Завдяки такому підходу суттєво зменшуються ризики, які можуть негативно вплинути як на впровадження проекту, так і безпосередньо на саму діяльність комунального підприємства.

Наприклад, для регіонів з великим потенціалом агробіомаси, робота нового КП може розпочатися з організації виробництва паливних брикетів з сільськогосподарських відходів (наприклад, соломи). Такі брикети можуть використовуватися в існуючих твердопаливних котлах об'єктів соціальної сфери. Після успішної реалізації проекту, стабільної роботи підприємства та аналізу поточної ситуації схему можна поступово ускладнювати. Наприклад, додати перевезення сільськогосподарських відходів або, при можливості, організувати їх збір та перевезення для виробництва брикетів. Доцільним є безпосередньо і розширення самого виробництва та продаж надлишку продукції

Табл. 2. Використання енергетичного потенціалу біомаси України (2017 р.)

Вид біомаси та напрямок використання	Потенціал, доступний для енергетики, тис. т	Обсяг, що вже використовується для потреб енергетики*		Частка використання від загального потенціалу, %
		тис. т	тис. т н.е.	
Солома зернових/ріпаку:	12258	371	130	3,0
- спалювання (тюки)		200	68	1,6
- виробництво та спалювання пелет		155	55	1,3
- виробництво та експорт пелет		0,97	0,35	0,01
- виробництво та спалювання брикетів		15	5,5	0,1
Стебла, стрижні кукурудзи	12828	15	5,0	0,1
Стебла, кошики сояшника	9299	0	0	0,0
Деревна біомаса:	10117	10037	2713	99,2
- спалювання (дрова)		7040	1848	69,6
- спалювання (тріска)		1405	340	13,9
- експорт дров/тріски		850	223	8,4
- виробництво та спалювання пелет		240	97	2,4
- виробництво та експорт пелет		332	135	3,3
- виробництво та спалювання брикетів		170	69	1,7
Лушпиння сояшника:	2374	1500	626	63,2
- спалювання		650	271	27,4
- виробництво та спалювання пелет		300	125	12,6
- виробництво та експорт пелет		450	188	19,0
Жом цукрового буряку (W 13%)	4410	200	10,2	4,5
Силос кукурудзи (зелений)**	27000	15	1,9	0,06
Гній тваринництва та послід птахівництва	30020	335	12,9	1,1
Всього	108306	12473	3499	в середньому: 11,5%

* Експертна оцінка авторів.

** За умови вирощування на 1 млн. га незадіяних сільськогосподарських земель.

(тобто обсягу, що залишився після забезпечення котельень місцевої об'єднаної територіальної громади) за ринковими цінами.

Паралельно можна організувати виробництво комунальним підприємством тріски в процесі відновлення та реконструкції полезахисних лісосмуг. Як показує

досвід роботи у даному напрямку, при цьому можна суттєво підсилити соціальну складову, безоплатно надаючи незахищеним верствам населення дрова з нетоварної частини отриманої деревини, що зменшить фінансове навантаження на бюджет громади. КП, розташоване у лісистій місцевості, може також займатися

виробництвом тріски з порубкових решток. При наявності достатньої площі незадіяних сільськогосподарських земель, комунальному підприємству доцільно зайнятися вирощуванням енергетичних культур з подальшим отриманням твердого біопалива.

Отже, покроковий підхід від простого та надійного до більш складного, але ефективнішого, з проміжним аналізом як поточної ситуації, так і перспектив на майбутнє, є ключовим при комбінації видів діяльності потенційного комунального підприємства для досягнення успішності його функціонування.

ТЕО проектів по заготівлі агробіомаси та виробництву біопалив і енергії з неї

Один з перспективних і прибуткових напрямків ро-

боти комунального підприємства може бути пов'язаний з заготівлею відходів та побічної продукції виробництва зернових культур. Оптимальним способом збирання соломи з поля є її тюкування з використанням прес-підбирачів. Форма, характеристики та розміри тюків для конкретних напрямків використання будуть відрізнятися, що потрібно враховувати при виборі відповідної техніки. Таким же є підхід до вибору обладнання для тюкування побічної продукції вирощування кукурудзи на зерно. Однак, слід зазначити, що у випадку прийняття рішення про тюкування стебел кукурудзи, необхідно використовувати спеціалізовану імпорту техніку, яка наразі в Україні малопоширена, а деякі машини навіть відсутні. Перевезення тюків може відбуватися як наявним транспортом підприємства, так

Табл. 3. Типове ТЕО заготівлі соломи у великих прямокутних тюках

Показники	Значення
Річні обсяги заготівлі соломи, т/рік	9000
Капітальні витрати, тис. грн.	23156
Амортизація, років	10
Операційні витрати, тис. грн./рік	2625
Продажна ціна тюкованої соломи, грн./т без ПДВ	1000
Простий термін окупності, років	4,6
Дисконтований термін окупності, років	5,4
Внутрішня норма дохідності (IRR), %	25,0

Табл. 4. Типове ТЕО виробництва брикетів з соломи

Показник	Значення
Продуктивність, кг/год.	480
Встановлена потужність електрообладнання, кВт	46
Капітальні витрати, тис. грн.	3470
Амортизація, років	8
Обслуговуючий персонал, чол.	2
Погодинна тарифна ставка з нарахуванням, грн.	58,4
Робочий час за добу, год./доба	16
Кількість днів роботи, днів/рік	250
Річна тривалість роботи, год.	4000
Річний виробіток, т	1920
Вартість сировини, грн./т без ПДВ	1000
Собівартість брикетів у мішках по 25 кг, грн./т	2102
Ціна реалізації брикетів, грн./т без ПДВ	2500
Простий термін окупності, років	3,7
Дисконтований термін окупності, років	4,1
Внутрішня норма дохідності (IRR), %	36

і спеціалізованою технікою.

Результати типового техніко-економічного обґрунтування заготівлі прямокутних тюків соломи пшениці комунальним підприємством показують, що простий термін окупності такого виду бізнесу становить 4,6 років з внутрішньою нормою дохідності 25% (табл. 3). В даному прикладі закладено високопродуктивну техніку, що дозволяє КП надавати послуги господарствам сусідніх районів, таким чином скорочуючи термін окупності проекту. Разом з цим це не є остаточною схемою діяльності для потенційного КП. Досить розповсюдженим підходом для такого бізнесу за кордоном є використання наявної необхідної техніки декількох власників (свого роду кооперативу), що може значно покращити показники проекту та навіть дати змогу обійтись без залучення стороннього фінансування.

Одним із ефективних напрямків використання біомаси сільськогосподарського походження є виробництво паливних брикетів та гранул, які вважаються «покращеним» твердим біопаливом з огляду на їх вищу теплотворну здатність, меншу вологість та загалом вищу енергетичну щільність у порівнянні з неущільненими видами біомаси та біопалива. З економічної точки зору виробництво брикетів з біомаси є більш привабливим, ніж виробництво гранул, оскільки інвестиції у лінію брикетування та експлуатаційні витрати є значно нижчими у порівнянні з лінією гранулювання аналогічної

продуктивності. Типове ТЕО виробництва брикетів з соломи прес-брикетувальником шнекового типу показує, що термін окупності такого проекту може становити менше 4 років при реалізації брикетів по ціні 2500 грн./т без ПДВ (табл. 4).

Біопаливо з агробіомаси, вироблене комунальним підприємством, може ефективно замінювати природний газ на об'єктах бюджетної сфери. У табл. 5 розглянуто два сценарії використання тюкованої соломи: в котлі потужністю 500 кВт з періодичним завантаженням та в котлі 1000 кВт з подрібнювачем/автоматизованою подачею палива. У першому випадку термін окупності проекту складає 4,2 роки з внутрішньою нормою дохідності майже 29%. У другому варіанті економічні показники трохи нижчі, але також прийнятні – термін окупності 5,6 років, IRR 16,6%. У проектах по заміщенню природного газу брикетами з соломи термін окупності всіх розглянутих варіантів (використання брикетів в котлі 200 кВт, 500 кВт, 1000 кВт) становить до 3,5 років при ціні брикетів 2500 грн./т без ПДВ (табл. 6).

Висновки

Україна має великий потенціал біомаси аграрного походження, доступний для виробництва енергії. Наразі цей потенціал (окрім лушпиння соняшника) використовується недостатньо активно. Практичний реалізації енергетичного потенціалу агробіомаси в

Табл. 5. ТЕО використання тюків соломи на котельнях об'єктів бюджетної сфери для заміщення природного газу

Показники	Потужність котла, кВт	
	500	1000
Вартість біопалива, грн./т без ПДВ	1000	1000
Нижча теплотворна здатність палива (солома, 15 % вологості), МДж/кг	13,5	13,5
ККД котла, %	80	82
Капітальні витрати, грн.	2468750	7300000
Амортизація, років	8	8
Коефіцієнт використання встановленої потужності котла в сезон	0,48	0,48
Кількість днів опалювального сезону	180	180
Річне виробництво теплової енергії, Гкал	847	1694
Річна витрата соломи, т	345,1	673,3
Питомі витрати електроенергії, кВт·год./Гкал	10	25
Заробітна плата з нарахуваннями, грн./міс.	9760	9760
Собівартість теплової енергії, грн./Гкал	1295	1356
Річна економія на закупівлі природного газу, тис. грн.	1093	2204
Простий термін окупності, років	4,2	5,6
Дисконтований термін окупності, років	4,8	6,7
Внутрішня норма дохідності (IRR), %	28,9	16,6

Табл. 6. ТЕО заміщення природного газу брикетами з соломи на котельнях об'єктів бюджетної сфери

Показники	Потужність котла, кВт		
	200	500	1000
Вартість біопалива, грн./т без ПДВ	2500	2500	2500
Нижча теплотворна здатність палива (брикети), МДж/кг	15	15	15
ККД котла, %	80	80	80
Капітальні витрати, грн.	320000	800000	1600000
Амортизація, років	8	8	8
Річне виробництво теплової енергії, Гкал	339	847	1694
Річна витрата брикетів, т	124,2	310,6	621,1
Питомі витрати електроенергії, кВт·год./Гкал	10	10	10
Заробітна плата з нарахуваннями, грн./міс.	9760	9760	9760
Собівартість теплової енергії, грн./Гкал	1662	1558	1420
Річна економія на закупівлі природного газу, тис. грн.	265	662	1324
Простий термін окупності, років	3,2	2,9	2,6
Дисконтований термін окупності, років	3,5	3,1	2,8
Внутрішня норма дохідності (IRR), %	45,3	52,6	62,9

Україні допоможе виконання міжнародного проекту «Сприяння впровадженню систем опалення на агробіомасі в сільських регіонах Європи» (AgroBioHeat) програми Горизонт 2020. Видається доцільним зосередитися також на можливості створення комунальних підприємств по заготівлі та переробці біомаси на базі об'єднаних територіальних громад. Одним з перспективних і прибуткових напрямків роботи таких комунальних підприємств може бути заготівля відходів та побічної продукції виробництва зернових культур з подальшим отриманням біопалива з цієї біомаси.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Енергетичний баланс України за 2017 рік*. Експрес-випуск Державної служби статистики України від 20.12.2018.

2. *Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Жовмір М.М., Матвєєв Ю.Б., Дроздова О.І.* Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 1. Відходи сільського господарства та деревна біомаса // *Промислова теплотехніка*. – 2010, т. 32, № 6, с.58-65.

3. *Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А.* Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні. Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України №7, 2014

<http://uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-7-ua.pdf>

4. *Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Драгнев С.В.* Аналіз можливостей виробництва та використання брикетів з агробіомаси в Україні. Аналітична записка

Біоенергетичної асоціації України №20, 2018

<http://uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-20-ua.pdf>

5. *Леся Матіюк*. Як спроектувати біоенергетичне село – розробка сценарію на прикладі м. Боярка. Презентація на семінарі «Біоенергетичне селище - енергонезалежність на місцевому рівні», 18.02.2016, Київ http://saee.gov.ua/sites/default/files/9_Matiyuk.pdf

6. *Олег Левченко*. Енергетичний патріотизм для малих громад. Презентація на семінарі «Біоенергетичне селище – енергонезалежність на місцевому рівні», 18.02.2016, Київ

http://saee.gov.ua/sites/default/files/2_Levchenko_3.pdf

7. *Станіслав Ігнат'єв*. Біоенергетичний кооператив: інструмент формування енергонезалежної громади. Презентація на Міжнародному форумі біоенергетичних технологій та альтернативної енергетики в агробізнесі AgroEnergyDay 2018, 30.10.2018, Київ

<http://www.uabio.org/img/files/Events/pdf/3-Ignatiev-EnergyCooperative-AgroEnergyDAY2018-30102018.pdf>

8. *Анна Пастух*. Створення енергетичних кооперативів в Україні: юридичні аспекти. Презентація на семінарі «Біоенергетичне селище - енергонезалежність на місцевому рівні», 18.02.2016, Київ

http://saee.gov.ua/sites/default/files/6_EC_Pastukh.pdf

OPPORTUNITIES FOR HARVESTING AGROBIOMASS AND PRODUCTION OF BIOFUELS BY MUNICIPAL ENTERPRISES IN UKRAINE

Zheliezna T.A., Drahnev S.V., Bashtovyi A.I.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2019.12>

The aim of the work is to analyze the possibilities and develop recommendations for the creation of communal enterprises in Ukraine for biomass harvesting and biofuel production based on the united territorial communities. The tasks of the work are to assess the potential of agrobiomass in Ukraine, to identify the promising areas of activity of the communal enterprises, and to carry out respective feasibility studies. The results of the assessment show that Ukraine has a big potential of biomass of agricultural origin available for energy production. At present, this potential (except for sunflower husk) is not actively used. The use of the whole energy potential of agrobiomass can cover about 18% of the final energy consumption in Ukraine. Activation of biomass energy production will be facilitated by the creation of communal companies for biomass harvesting and biofuel production. Perspective areas of activity of such enterprises can be harvesting of agricultural residues, growing energy crops, production of chips from logging residues, harvesting of wood fuel during the restoration and reconstruction of protective forest bands, production of pellets and briquettes from agrobiomass. When choosing a particular type of activity of a potential communal enterprise or a combining several activities, it is necessary to apply a step-by-step approach from simple and reliable to more complex but more efficient activity, with an interim analysis of both the current situation and prospects for the future. Such an approach is key in the combination of activities of the enterprise to achieve the success of its operation. The results of typical feasibility studies demonstrate economic viability of projects for the production of biofuels from straw and their application at boiler plants of the budget-financed objects for replacement of natural gas.

References 8, tables 6.

Keywords: biomass, agrobiomass, biomass potential, biomass harvesting, biofuel, communal enterprise.

1. *Enerhetychnyi balans Ukrainy za 2017 rik*. Ekspres-vypusk Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy vid 20.12.2018 [Energy balance of Ukraine for 2017. Express-issue by State Statistics Service of Ukraine of 20.12.2018] (Ukr.)

2. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Zhovmir M.M., Matveev Yu.B., Drozdova O.I. Otsinka enerhetychnoho potentsialu biomasy v Ukraini. Chastyna 1. Vidkhody silskoho hospodarstva ta derevna biomasa [Assessment of the energy potential of biomass in Ukraine. Part 1. Agricultural waste and wood biomass], *Promyshliennaia tieplotiekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2010, V. 32, № 6, P. 58-65. (Ukr.)

3. Geletukha G.G., Zheliezna T.A. Perspektyvy vykorystannia vidkhodiv silskoho hospodarstva dlia vyrobnytstva enerhii v Ukraini. Analitychna zapyska Bioenerhetychnoi asotsiatsii Ukrainy №7 [Prospects for the use of agricultural residues for energy production in Ukraine. Position Paper No. 7 by the Bioenergy Association of Ukraine], 2014

<http://www.uabio.org/img/files/docs/Position-paper-UABIO-7-EN.pdf>

4. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V. Analiz mozhlyvosti vyrobnytstva ta vykorystannia bryketiv z ahrobiomasy v Ukraini. Analitychna zapyska Bioenerhetychnoi asotsiatsii Ukrainy №20 [Analysis of possibilities for the production and use of agrobiomass briquettes in Ukraine. Position Paper No. 20 by the Bioenergy Association of Ukraine]

<http://www.uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-20-en.pdf>

5. Lesia Matiuk. Yak sproektuvaty bioenerhetychne selo – rozrobka stsenariiu na prykladi m. Boiarka. Prezentatsiia na seminari «Bioenerhetychne selyshche - enerhonezalezhnist na mistsevomu rivni» [How to design a bioenergy village – development of a scenario on the example of Boyarka. Presentation at the seminar "Bioenergy village – energy independence at the local level"], 18.02.2016, Kyiv. (Ukr.)

http://sae.gov.ua/sites/default/files/2_Levchenko_3.pdf

6. Oleh Levchenko. Enerhetychnyi patriotyzm dlia malykh hromad. Prezentatsiia na seminari «Bioenerhetychne selyshche - enerhonezalezhnist na mistsevomu rivni» [Energy patriotism for small communities. Presentation at the seminar "Bioenergy village – energy independence at the local level"], 18.02.2016, Kyiv. (Ukr.)

http://sae.gov.ua/sites/default/files/2_Levchenko_3.pdf

7. Stanislav Ihnatiev. Bioenerhetychnyi kooperatyv: instrument formuvannia enerhonezalezhnoi hromady. Prezentatsiia na Mizhnarodnomu forumi bioenerhetychnykh tekhnolohii ta alternatyvnoi enerhetyky v ahrobiznesi AgroEnergyDay [Bioenergy cooperatives: A tool for the formation of an energy-independent community. Presentation

at the International Forum on Bioenergy Technologies and Alternative Energy in Agribusiness AgroEnergyDay] 2018, 30.10.2018, Kyiv. (Ukr.)

<http://www.uabio.org/img/files/Events/pdf/3-Ignatiev-EnergyCooperative-AgroEnergyDAY2018-30102018.pdf>

8. *Anna Pastukh*. Stvorennia enerhetychnykh koope-ratyviv v Ukraini: yurydychni aspekty. Prezentatsiia na seminari «Bioenerhetychne selyshche - enerhonezalezhnist

na mistsevomu rivni»ky [Creation of energy co-operatives in Ukraine: legal aspects. Presentation at the seminar "Bioenergy village – energy independence at the local level"], 18.02.2016, Kyiv. (Ukr.)

http://saee.gov.ua/sites/default/files/6_EC_Pastukh.pdf

Отримано 01.03.2019

Received 01.03.2019