

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ
НАН УКРАИНЫ

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРИКЛАДНОЙ
ЖУРНАЛ

Выходит 6 раз в год
Основан в 1979 г.

Том 37, № 5, 2015

Главный редактор – Долинский А.А.

Редакционная коллегия:

Авраменко А.А.
Бабак В.П.
Базеев Е.Т.
Басок Б.И. – зам. главного редактора
Буляндра А.Ф.
Гелетуха Г.Г.
Дубовской С.В.
Клименко В.Н.
Круковский П.Г.
Письменный Е.Н.
Пятничко А.И.
Сигал А.И.
Снежкин Ю.Ф.
Фиалко Н.М.
Халатов А.А.
Чайка А.И.
Шморгун В.В. – ответственный секретарь

Редакционный совет:

Алексеев С.В. (Россия)
Вацлавик Ю. (Польша)
Коверда В.П. (Россия)
Коновалов В.И. (Россия)
Люриг Х. (Германия)
Маджамдар А. (Канада)
Матеи И. (Румыния)
Мизута И. (Япония)
Минг-Шан-Жу (Китай)
Накоряков В.Е. (Россия)
Сайред Н. (Великобритания)
Тоттен Дж. Е. (США)

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В.,
Навродская Р.А.

Теплофизические характеристики высокотепло-
проводных полимерных микро- и нанокомпозитов.....5

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

Мных А.С., Яковлева И.Г., Пазюк М.Ю.,
Овчинникова И.А.

Исследование газодинамического сопротивления
слоя полидисперсной агломерационной шихты,
подготовленной к спеканию.....16

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СУШКИ

Михайлик В.А., Снежкин Ю.Ф., Коринчевська Т.В.,
Горніков Ю.І.

Вплив режиму конвективного сушіння на кристалічність
порошків з яблук та цукрового буряку..... 23

Шаркова Н.О., Турчина Т.Я., Жукотський Е.К.

Дослідження та оптимізація теплотехнологічних
параметрів процесу отримання сухої форми гідролізо-
ваного білкового продукту методом розтпилювання.....38

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Билека Б.Д., Гаркуша Л.К.

Котельная с внутрицикловыми когенерационно-
теплонасосными установками.....43

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Халатов А.А., Северин С.Д., Доник Т.В.

Анализ термодинамического цикла блока преобразова-
ния энергии ЯЭУ с гелиевым реактором для производ-
ства электроэнергии и водорода.....49

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Трибой А.В.

Перспективы выращивания и использования
энергетических культур в Украине. Часть 2.....58

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Басок Б.И., Недбайло О.М., Ткаченко М.В., Божко І.К.,
Лисенко О.М., Луніна А.О.

Модернізація системи опалення будівлі з використан-
ням теплового насоса типу "повітря-рідина".....68

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Степанова А.И.,
Гнедаш Г.А.

Эффективность элементов комбинированной теплоути-
лизационной системы для подогрева воды и дутьевого
воздуха котельной установки.....75

ТЕРМОДИНАМИКА И ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА

Драганов Б.Х.

Поля солнечной радиации в растительном покрове.....84

ИЗМЕРЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Коньк А.В.

Обзор и анализ международных нормативных документов, определяющих уровень безопасности и качества питьевой воды.....87

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF ENGINEERING
THERMOPHYSICS

INDUSTRIAL HEAT ENGINEERING

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND
APPLIED JOURNAL

Published bimonthly
Founded in 1979

Volume 37, № 5, 2015

Editor in Chief – **A. DOLINSKY**

Editorial Board Members:

A. Avramenko
V. Babak
E. Bazeev
B. Basok – Associated Editor
A. Bulyandra
G. Geletykha
S. Dubovskoi
V. Klimenko
P. Krukovsky
Ye. Pysmennyy
A. Pyatnichko
A. Sigal
Yu. Snezhkin
N. Fialko
A. Khalatov
A. Chaika
V. Shmorgun – Responsible Secretary

Advisory Editorial Board:

S. Alekseenko (Russia)
J. Wazlawik (Poland)
V. Coverda (Russia)
V. Konovalov (Russia)
H. Lurig (Germany)
A. Mujumdar (Canada)
J. Matei (Romania)
Y. Mizuta (Japan)
Ming-Shan-Zhu (China)
V. Nakoryakov (Russia)
N. Syred (United Kingdom)
G. Totten (USA)

HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES

**Dolinskiy A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V.,
Navrodszkaya R.A.**

Thermophysical properties of the highly heat-conducting
polymeric micro- and nanocomposites.....5

HEAT AND MASS EXCHANGE APPARATUS

**Mnyh A.S., Yakovleva I.G., Pazuk M.U.,
Ovchinikova I.A.**

The study of gas-dynamic resistance of the layer of
agglomeration charge, prepared for sintering.....16

THEORY AND PRACTICE OF DRYING

**Mykhailyk V.A., Snezhkin Yu.F., Korinchevska T.V.,
Gornikov Yu.I.**

Impact of the mode of convective drying on the crystallinity
of apple and sugar beet powders.....23

Sharkova N.O., Turchina T.Ya., Zhukotsky E.K.

Research and optimization of heat technological
parameters forms of obtaining dry hydrolyzed protein
product by sprayng.....38

HEAT POWER UNITS

Bileka B.D., Garkusha L.K.

The boiler-house with intersycle cogeneration heat
pumping plants.....43

NUCLEAR POWER

Khalatov A.A., Severin S.D., Donyk T.V.

Thermodynamic analysis of the energy conversion unit of
nuclear energy plant with helium reactor for the electricity
and hydrogen production.....49

RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

Geletukha G., Zheliezna T., Tryboi O.

Prospects for growing and use of energy
crops in Ukraine. Part 2.....58

ENERGY SAVING

**Basok B.I., Nedbaylo A.N., Tkachenko M.V., Bozhko I.K.,
Lysenko O.N., Lunina A.A.**

Modernization of building's heating system using heat
pump type "air-liquid".....68

ECONOMIC EFFICIENCY OF ROWER PROJECTS

Fialko N., Navrodszkaya R., Stepanova A., Gnedash G.

Efficiency of elements of combined heatutilisation system
for heating of water and combustion air.....75

**THERMODYNAMICS AND TRANSPORT
PHENOMENA**

Draganov B.Kh.

The solar radiation field in the vegetation.....84

**MEASUREMENT, CONTROL, AUTOMATION OF
THERMAL PROCESSES**

Konyk A.V.

Review and analysis of international normative documents, qualificatory strength and quality of drinking-water security.....87

УДК 538.9:536.6

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРО- И НАНОКОМПОЗИТОВ

Долинский А.А.¹, академик НАН Украины, Фиалко Н.М.¹, член-корреспондент НАН Украины, Динжос Р.В.², канд. физ.-мат. наук, Навродская Р.А.¹, канд. техн. наук

¹ Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2 а, Киев, 03680, Украина

² Николаевский национальный университет им. В.А.Сухомлинского, ул. Никольская, 24, Николаев, 54030, Украина

Наведено результати досліджень з розробки типоряду високотеплопровідних полімерних мікро- і нанокompозитів на основі частково кристалічних та аморфних полімерів для виготовлення теплообмінних поверхонь. Представлено дані експериментів з визначення таких характеристик композиційних матеріалів цього типоряду, як коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність та максимальна температура експлуатації.

Приведены результаты исследований по разработке типорядов высокотеплопроводных полимерных микро- и нанокompозитов на основе частично кристаллических и аморфных полимеров для изготовления теплообменных поверхностей. Представлены данные экспериментов по определению таких характеристик композиционных материалов этого типорядов, как коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и максимальная температура эксплуатации.

The results of research to develop of the type series of the high-heat transfer polymer micro- and nanocomposites based on partially crystalline and amorphous polymers for the manufacture of heat exchange surfaces are presented. The data of experiments to determine such characteristics of the composite materials of this series as thermal conductivity, specific heat and maximum operating temperature are given.

Библ. 10, рис. 3, табл. 4.

Ключевые слова: полимерные микро- и нанокompозиты, теплообменные поверхности, теплофизические свойства.

c_p – удельная массовая теплоемкость, кДж/(кг·К);

T – температура, К;

$T_{\max}^{\text{ЭК}}$ – максимальная температура эксплуатации композита, К;

$T_{\text{пл}}, T_{\text{ст}}$ – температура плавления и стеклования, К;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

χ – степень кристалличности, %;

ω – массовая доля наполнителя, %;

Сокращения:

ПК – поликарбонат;

ПММА – полиметилметакрилат;

ПП – полипропилен;

ПЭ – полиэтилен;

УНТ – углеродные нанотрубки.

Введение

Перспективность использования полимерных микро- и нанокompозитов для создания теплообменных поверхностей различного назначения связана с комплексом их характеристик, таких как необходимые теплофизические свойства, высокая коррозионная стойкость, относительно небольшой удельный вес и пр. [1-7].

При разработке данных композитов и анализе их теплофизической эффективности в первую очередь следует принимать во внимание предъ-

являемые к ним требования в части теплопроводящих свойств и допустимых уровней рабочих температур. И поскольку для теплообменников разного типа отмеченные требования могут весьма существенно отличаться, то актуальной является задача создания соответствующего ряда модификаций полимерных композитов.

В настоящей статье рассматриваются основные аспекты разработки микро- и нанокompозиционных полимерных материалов для изготовления теплообменных поверхностей с различным

диапазоном температур эксплуатации и разными теплопроводящими свойствами материала их стенок.

Постановка задачи и методика проведения исследований

В работе ставилась задача разработки типо-

ряда полимерных микро- и нанокомпозитов с коэффициентом теплопроводности, изменяющимся от 20 до 60 Вт/(м·К), и максимальной температурой эксплуатации, находящейся в пределах 390...470 К. В табл. 1 приведены основные характеристики и обозначения материалов данного типоряда.

Таблица 1. Основные характеристики и обозначения разрабатываемого типоряда полимерных композиционных материалов для теплообменных поверхностей

λ , Вт/(м·К)	Обозначения элементов типоряда материалов		
	Максимальная температура эксплуатации материала, К		
	390	425	470
20	A1	B1	C1
25	A2	B2	C2
30	A3	B3	C3
35	A4	B4	C4
40	A5	B5	C5
45	A6	B6	C6
50	A7	B7	C7
55	A8	B8	C8
60	A9	B9	C9

Возможности разработки указанного типоряда материалов рассматривались с использованием в качестве полимерных матриц частично кристаллических полимеров – полиэтилена, полипропилена и поликарбоната, и аморфного полимера – полиметилметакрилата. При этом в качестве наполнителей применялись УНТ, а также микрочастицы меди и алюминия. Содержание наполнителей варьировалось от 0,2 до 10 %. Методы получения наполнителей – УНТ и микрочастиц алюминия, а также их характеристики описаны в [8]. Что же касается микрочастиц меди, то они готовились таким же образом, как и частицы алюминия. Для получения композитов использовался метод, основанный на смешивании компонентов в расплаве полимера [9].

В задачу работы входило проведение экспериментальных исследований величин коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости композитов, составленных из рассматриваемых полимерных матриц и наполнителей в заданном диапазоне изменений доли наполнителей. Мето-

дики определения указанных теплофизических свойств приведены в [8].

На основе полученных температурных зависимостей теплоемкости находились значения температур плавления для композитов с частично кристаллической матрицей и температур стеклования для композитов с аморфной матрицей. Соответствующие максимальные температуры эксплуатации композитов определялись из условия, согласно которому температура плавления (стеклования) должна превышать данную температуру примерно на 20 К [10].

Полученные экспериментальные данные о зависимостях $\lambda = f(\omega)$ для исследуемых полимерных композитов, а также данные о максимальных значениях температур их эксплуатации служили основой для определения разрабатываемого типоряда материалов. Далее из множества композитов, отвечающих некоторому элементу данного типоряда, выбирался один из соображений наименьшей стоимости составляющих его компонентов.

Результаты исследований и их анализ

Рассмотрим вначале данные экспериментальных исследований зависимости от температуры удельной теплоемкости получаемых полимерных композитов. На рис. 1 представлены характерные результаты этих исследований для композитов на основе частично кристаллических полимеров (ПЭ, ПП, ПК), на рис. 2 – для композитов на

основе аморфного полимера ПММА. Приведенные данные отвечают максимальному из рассмотренных значений содержания микро- и нанонаполнителей ($\omega = 10\%$), при котором, как показали выполненные эксперименты, имеют место наибольшие отклонения величин теплоемкости от ее значений для ненаполненного полимера.

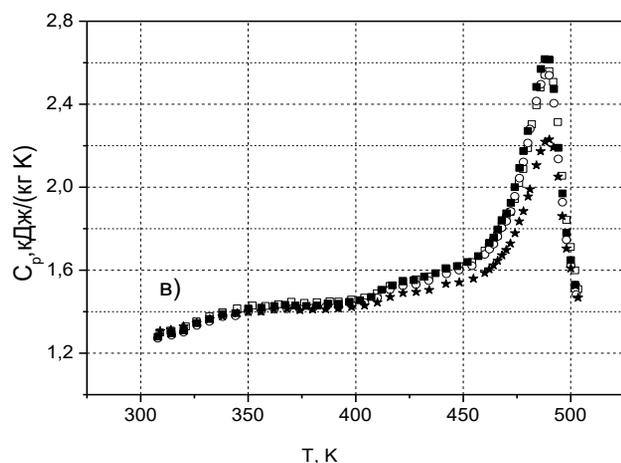
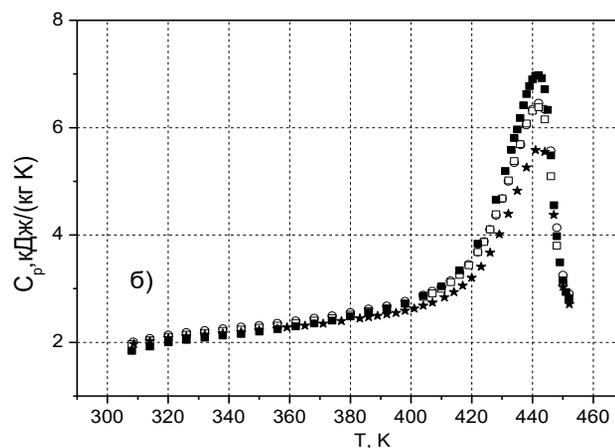
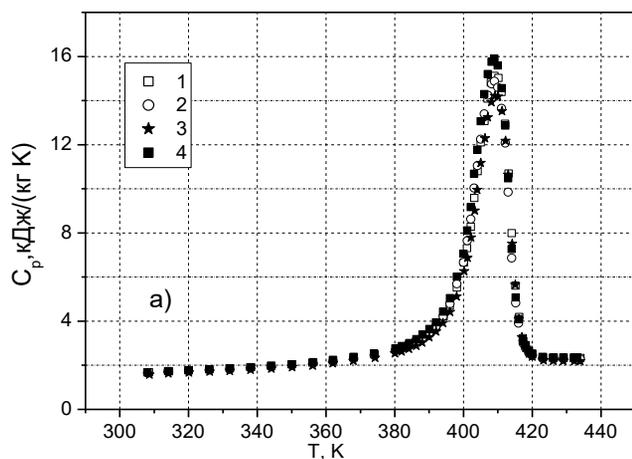


Рис. 1. Зависимость от температуры удельной теплоемкости композитов на основе частично кристаллических полимеров – полиэтилена (а), полипропилена (б), и поликарбоната (в) при использовании различных наполнителей для $\omega = 10\%$: 1 – Al; 2 – Cu; 3 – УНТ; обозначение 4 отвечает соответствующим полимерным матрицам.

Как видно из рис. 1, теплоемкость композитов на основе всех рассматриваемых полимерных матриц в области ее наибольших значений, отвечающих интервалу температур плавления, оказывается несколько ниже, чем теплоемкость соответствующих матриц. Указанное понижение для композитов на основе одной и той же полимерной матрицы является максимальным по величине при использовании в качестве наполнителя углеродных нанотрубок, несколько меньшим – микрочастиц меди, и наименьшим –

микрочастиц алюминия.

На основе полученных зависимостей $c_p = f(T)$ могут быть определены значения степени кристалличности разработанных композитов по соотношению, приведенному в [10]. Соответствующие результаты расчетов представлены в табл. 2.

Согласно приведенным в таблице данным степень кристалличности полимерных матриц превышает ее значения для композиционных материалов на основе этой матрицы. Причем величина указанного превышения зависит от

типа используемого наполнителя. А именно, наибольшее превышение отвечает углеродным нанотрубкам, наименьшее – алюминию. Описанная картина изменения степени кристалличности композитов отвечает, как будет показано ниже, определенным закономерностям поведения коэффициентов теплопроводности данных материалов.

Характер температурной зависимости c_p

для композитов на основе аморфного полимера существенно отличается от такового для частично кристаллических полимеров (сопоставьте данные на рис. 1 и 2). Как видно, теплоемкость композитов на основе аморфных полимеров повышается с ростом температуры, зависимость же от температуры теплоемкости композитов на основе частично кристаллических полимеров носит экстремальный характер.

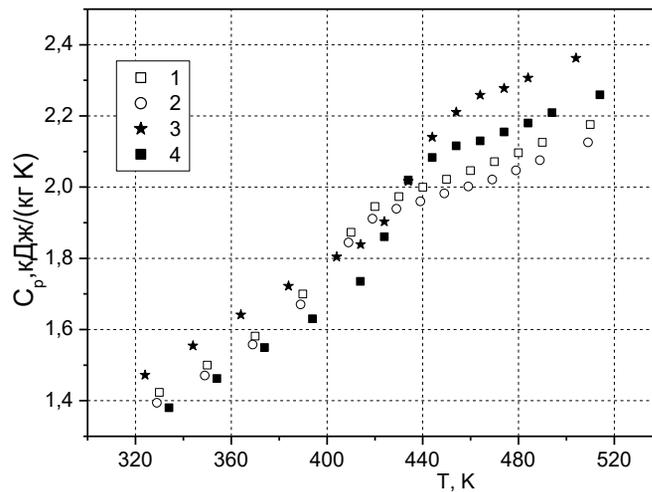


Рис. 2. Зависимость от температуры удельной теплоемкости композитов на основе полиметилметакрилата при использовании различных наполнителей для $\omega = 10\%$: 1 – Al; 2 – Cu; 3 – УНТ; обозначение 4 отвечает полимерной матрице.

Таблица 2. Значения степени кристалличности полимерных матриц χ_m , композитов χ_k и величины их отличий $\Delta\chi$ ($\Delta\chi = \chi_m - \chi_k$) при $\omega = 10\%$

Тип полимерной матрицы	Степень кристалличности матрицы $\chi_m, \%$	Тип наполнителя	Степень кристалличности композита $\chi_k, \%$	Отличие степени кристалличности $\Delta\chi, \%$
ПЭ	76,0	Al	71,3	4,7
		Cu	69,4	6,6
		УНТ	63,8	12,2
ПП	51,0	Al	46,8	4,2
		Cu	43,8	7,2
		УНТ	31,3	19,7
ПК	24,0	Al	23,7	0,3
		Cu	23,4	0,6
		УНТ	21,5	2,5

Как видно из рис. 2, величина c_p для наполненных аморфных полимеров в диапазоне температур от температуры окружающей среды до температуры стеклования композита изменяется практически линейно. При этом теплоемкость ненаполненного полимера во всем указанном диапазоне оказывается более низкой, чем композитов. Что же касается последних, то их теплоемкость по мере убывания ранжируется следующим образом: композиты, наполненные углеродными нанотрубками, микрочастицами меди и алюминия. Следует отметить, что таким же образом ранжируются и теплоемкости указанных наполнителей.

Согласно полученным данным, при приближении к температуре стеклования теплоемкость как наполненных, так и ненаполненных аморфных полимеров весьма резко возрастает. Величина данного возрастания Δc_p определяет, как известно, энергию активации, необходимую для перехода из стеклообразного состояния в вязкотекучее. Как видно из рис. 2, значение Δc_p является наибольшим для полимеров, наполненных УНТ, и существенно меньше для полимеров, наполненных микрочастицами меди алюминия. Так, $\Delta c_p = 0,30; 0,18$ и $0,14$ кДж/(кг·К) при наполнении полиметилметакрилата УНТ, Cu и Al.

Приведенные на рис. 1 и 2 зависимости $c_p = f(T)$ позволяют определить максимальные температуры их эксплуатации. Как свидетельствуют полученные данные (рис. 1), температуры плавления рассмотренных композитов на основе частично кристаллических полимеров практически совпадают с температурами плавления соответствующих ненаполненных полимеров. То есть температуры плавления композитов на основе полиэтилена равны 410 К, на основе полипропилена 445 К и на основе поликарбоната 490 К. Соответствующие максимальные температуры эксплуатации, найденные из указанного выше условия $T_{\max}^{\text{ЭК}} = T_{\text{пл}} - 20$ К, составляют 390, 425, 470 К.

Несколько иная картина наблюдается для разрабатываемых композитов на основе аморфного полимера ПММА. Здесь температуры стеклования для композитов и ненаполненного полимера не совпадают. При этом эти температуры для композитов в зависимости от типа наполни-

теля могут быть как больше, так и меньше температуры стеклования ненаполненного полимера. Так, для полимеров, наполненных УНТ, температура стеклования превышает ее значение для полимерной матрицы. (При $\omega = 10$ % температура $T_{\text{ст}}$ для композитов с УНТ составляет 435 К, а для матрицы – 424 К). Для полимеров, наполненных Cu и Al, температура стеклования оказывается ниже, чем для полимерной матрицы. (При $\omega = 10$ % величина $T_{\text{ст}}$ для этих композитов равняется примерно 410 К). Если принять для рассматриваемого типа композитов в качестве температуры стеклования наименьшую из указанных выше температур ($T_{\text{ст}} \approx 410$ К), то максимальная температура эксплуатации составит 390 К. То есть рассматриваемые композиты на основе аморфного полимера ПММА могут быть отнесены к материалам типа А (см. табл. 1).

Перейдем далее к анализу результатов экспериментальных исследований по определению величины коэффициента теплопроводности разрабатываемых полимерных композитов. Данные на рис. 3 иллюстрируют зависимости значений коэффициента теплопроводности композитов от массовой доли рассматриваемых наполнителей ω для всех используемых в рамках настоящей работы полимерных матриц. Согласно результатам проведенных исследований при увеличении содержания наполнителей имеет место повышение значений λ . Причем это повышение при некоторых содержаниях наполнителя, называемых порогами перколяции, является достаточно резко выраженным. В рассматриваемых условиях значения первого порога перколяции, отвечающего образованию из частичек наполнителя непрерывного перколяционного кластера, находится в диапазоне $\omega = 0,5...0,8$ %, а второго порога перколяции, соответствующего формированию перколяционной сетки, – в диапазоне $\omega = 1,8...2,5$ %.

Как видно из рис. 3, разрабатываемые композиты характеризуются весьма широкими пределами изменения коэффициента теплопроводности. При этом максимально достижимые уровни λ композитов являются существенно различными для разных наполнителей. Так, для $\omega = 10$ % величины коэффициентов теплопроводности

композитов могут достигать 60,9; 41,5 и 28,9 Вт/(м·К) при использовании в качестве наполнителей УНТ, Си и Al соответственно.

Что же касается полимерных матриц, то, как свидетельствуют полученные данные, каждому типу наполнителя отвечает определенная матрица, при использовании которой коэффициент теплопроводности композита для фиксированного значения содержания наполнителя является наибольшим. Так, в диапазоне изменения $\lambda = 20 \dots 60$ Вт/(м·К) указанное наибольшее значение λ для УНТ имеет место при использовании в качестве полимерной матрицы ПММА, а для Си и Al – матрицы из ПП. С другой стороны, каждому типу наполнителя соответствует полимерная матрица, в случае применения которой λ композита оказывается наименьшим при заданной величине ω . Для рассматриваемого диапазона изменения коэффициента теплопроводности композита

его наименьшее значение наблюдается для УНТ при использовании матрицы из полиэтилена или поликарбоната в зависимости от величины ω , для Си – матрицы из полиэтилена и для Al – матрицы из поликарбоната.

Согласно результатам выполненных исследований при использовании частично кристаллических матриц изменение степени их кристалличности, наблюдаемое в процессе получения композиционного материала, коррелируется определенным образом с уровнем теплопроводящих свойств данного материала. Как уже отмечалось, степень кристалличности композита для всех рассмотренных ситуаций оказывается меньше ее величины для соответствующего ненаполненного полимера. Действительно, ввиду образования в композите разветвленных перколяционных структур степень кристалличности полимерной матрицы уменьшается. При

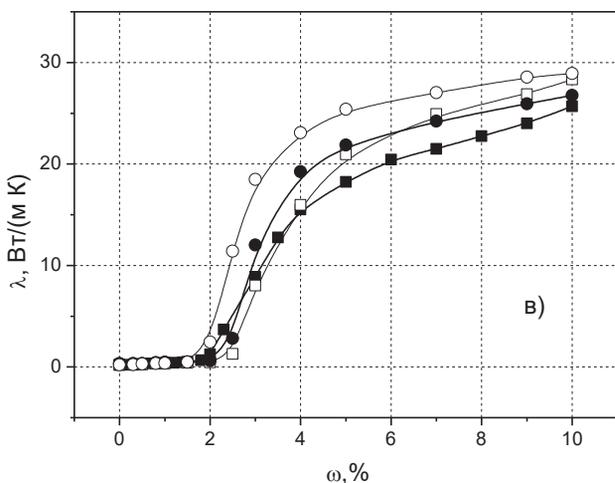
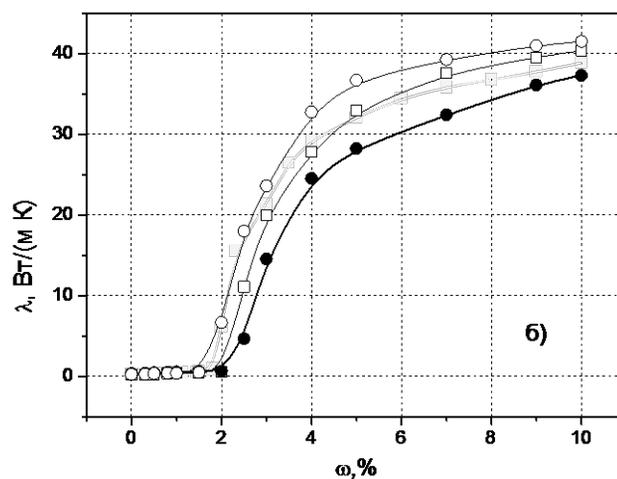
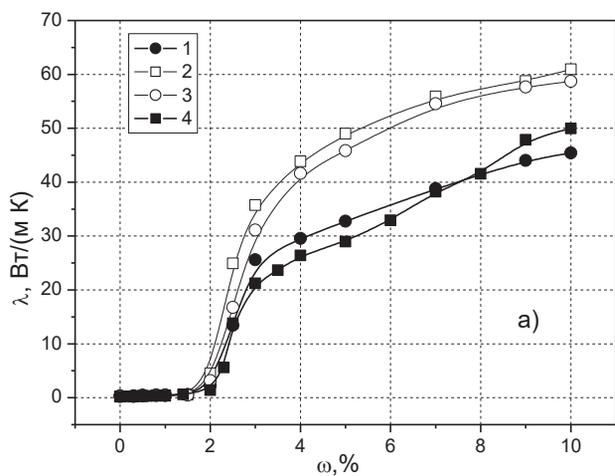


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности полимерных композиционных материалов от массовой доли наполнителя при использовании в качестве полимерных матриц полиэтилена (1), полиметилметакрилата (2), полипропилена (3) и поликарбоната (4) для различных типов наполнителя: а) УНТ; б) Си; в) Al.

этом чем более разветвленными являются данные структуры, тем значительно снижается указанная степень кристалличности. В плане же величин коэффициентов теплопроводности композитов развитие проводящих перколяционных структур обуславливает повышение теплопроводящих свойств композиционных материалов. Таким образом, большим отличиям степени кристалличности ненаполненных полимеров и соответствующих композитов должны отвечать более высокие значения коэффициентов теплопроводности композитов. Полученные экспериментальные данные подтверждают справедливость приведенных соображений. Например, при использовании полипропилена указанные отличия степени кристалличности составляют для наполнителей из Al, Cu и УНТ 4,2; 7,2 и 19,7 % (табл. 2). Соответствующие же значения коэффициентов теплопроводности композитов равны 28,9; 41,5 и 58,7 Вт/(м·К).

На основе результатов выполненных исследований коэффициентов теплопроводности полимерных композитов были определены их составы, при которых значения λ равны соответствующим заданным величинам для разрабатываемого типоряда материалов (см. табл. 3). С использованием данных, приведенных в табл. 3, и результатов экспериментов по нахождению максимальных температур эксплуатации разрабатываемых композитов были установлены их составы для каждого из элементов указанного типоряда. При этом принималось во внимание следующее. Полагалось, что в каждую из рассматриваемых групп композитов А, В и С включаются композиты, максимальная температура которых превышает некоторую заданную для данной группы величину $T_{\max}^{\text{ЭК}}$. Соответственно этому, группу А составляли все рассматриваемые композиты, группу В – композиты на основе полипропилена и поликарбоната, а группу С – композиты на основе поликарбоната.

Согласно полученным данным каждому элементу разрабатываемого типоряда может отвечать множество композитов. Так, элементу А1 соответствует 12 композитов, элементу В1 – 6, элементу С1 – 3. Из каждого множества композитов был выбран один по соображениям минимальной общей стоимости его компонентов

(см. табл. 4). При расчетах указанные стоимости принимались по данным Лондонской товарной биржи, осредненным за период с сентября 2014 г. по август 2015 г., и составляли за тонну материала: для полиэтилена – 268\$, полиметилметакрилат – 305\$, полипропилена – 315 \$, поликарбоната – 390\$, УНТ – 3350\$, Cu – 5800\$ и Al – 2030\$.

Как видно из табл. 4, стоимость материалов для композитов группы В весьма незначительно превышает стоимость материалов для соответствующих элементов группы А. Это связано с тем, что стоимость полипропилена, являющегося матрицей для всех композитов группы В, не намного превышает стоимость матрицы из полиметилметакрилата, на основе которой сформировано большинство композитов группы А. Кроме того наблюдаемая тенденция к повышению доли наполнителя для материалов группы В по сравнению с группой А является весьма слабо выраженной. То есть доля стоимости наполнителей в общей стоимости композита повышается для материалов группы В незначительно.

Что же касается соотношения стоимостей материалов для композитов групп В и С, то имеют место ее существенно большие значения для материалов группы С. Последнее обусловлено, с одной стороны, более высокой стоимостью матрицы (поликарбоната), с другой – большей стоимостью наполнителя ввиду значительного увеличения его доли в композиционном материале.

Полученные данные о составе композитов для материалов теплообменных поверхностей свидетельствуют также о том, что в перечне разработанных композитов отсутствуют полимеры, наполненные микрочастицами меди. Данное обстоятельство связано с тем, что стоимость меди существенно превосходит стоимость других рассматриваемых наполнителей. Так, она превышает стоимость алюминия в 2,8 раза, а углеродных нанотрубок – 1,7 раза.

Характеризуя в целом материалы разработанного типоряда, следует также отметить, что они обладают высокой коррозионной стойкостью. Это является весьма важным при создании широко применяемых теплообменных аппаратов, которые эксплуатируются в условиях воздействия агрессивных сред. Традиционно в таких ситуациях в качестве материалов для теплообменных

Таблица 3. Характеристики полимерных микро- и нанокompозитов, значения коэффициентов теплопроводности которых равны заданным величинам для разрабатываемого типа материала

λ композита, Вт/(м·К)	Тип полимерной матрицы	Тип наполнителя	ω , %	Суммарная стоимость компонентов композита, \$	λ композита, Вт/(м·К)	Тип полимерной матрицы	Тип наполнителя	ω , %	Суммарная стоимость компонентов композита, \$																																								
20	ПЭ	УНТ	2,8	354	30	ПП	УНТ	3,1	409																																								
	ПЭ	Cu	3,5	462		ПП	Cu	3,8	517																																								
	ПЭ	Al	4,3	344		ПК	УНТ	5,2	544																																								
	ПММА	УНТ	2,4	378		ПК	Cu	4,3	623																																								
	ПММА	Cu	3,1	475		ПЭ	УНТ	5,8	447																																								
	ПММА	Al	4,9	389		ПЭ	Cu	7,1	661																																								
	ПП	УНТ	2,6	396		ПММА	УНТ	3,1	399																																								
	ПП	Cu	2,7	463		ПММА	Cu	6,0	635																																								
	ПП	Al	3,3	372		ПП	УНТ	3,4	418																																								
	ПК	УНТ	2,9	476		ПП	Cu	4,6	567																																								
25	ПК	Cu	2,9	547	35	ПК	УНТ	6,3	576																																								
	ПК	Al	5,9	487		ПК	Cu	6,4	736																																								
	ПЭ	УНТ	3,2	367		ПЭ	УНТ	7,5	499																																								
	ПЭ	Cu	4,2	500		ПММА	УНТ	3,5	412																																								
	ПЭ	Al	8,0	409		ПММА	Cu	9,5	827																																								
	ПММА	УНТ	2,5	381		ПП	УНТ	3,9	433																																								
	ПММА	Cu	3,6	503		ПП	Cu	7,9	838																																								
	ПММА	Al	7,2	429		ПК	УНТ	7,5	612																																								
	ПП	УНТ	2,8	400		ПЭ	УНТ	9,6	564																																								
	ПП	Cu	3,2	490		40	ПММА	УНТ	4,2	433																																							
ПП	Al	5,0	401	ПП	УНТ		4,8	461																																									
ПК	УНТ	3,8	502	ПК	УНТ		8,5	642																																									
ПК	Cu	3,4	574	ПММА	УНТ		5,3	466																																									
ПК	Al	9,5	546	ПП	УНТ		6,0	497																																									
ПЭ	УНТ	4,1	394	ПК	УНТ		10,0	686																																									
ПЭ	Cu	5,9	594	ПММА	УНТ		7,0	518																																									
ПММА	УНТ	2,8	390	ПП	УНТ		7,5	542																																									
ПММА	Cu	4,5	552	ПММА	УНТ		9,5	594																																									
30	ПММА	УНТ	4,5	552	60		ПММА	УНТ	9,5	594																																							
						55					ПММА	УНТ	7,0	518																																			
															50	ПК	УНТ	10,0	686																														
																				45	ПП	УНТ	6,0	497																									
																									40	ПММА	УНТ	5,3	466																				
																														35	ПК	УНТ	8,5	642															
																																			30	ПП	УНТ	4,8	461										
																																								25	ПММА	УНТ	4,2	433					
																																													20	ПЭ	УНТ	9,6	564
10	ПЭ	УНТ	7,5	612																																													
					5	ПММА	УНТ	7,5	612																																								

Таблица 4. Характеристики полимерных микро- и нанокомпозитов разработанного типоряда материалов для теплообменных поверхностей

Обозначение элементов типоряда материалов	Тип полимера	Тип наполнителя	ω , %	Стоимость материалов, \$		
				матрица	наполнитель	суммарная стоимость компонентов композита
A1	ПЭ	Al	4,3	257	87	344
A2	ПЭ	УНТ	3,2	260	107	367
A3	ПММА	УНТ	2,8	296	94	390
A4	ПММА	УНТ	3,1	295	104	399
A5	ПММА	УНТ	3,5	294	118	412
A6	ПММА	УНТ	4,2	292	141	433
A7	ПММА	УНТ	5,3	289	177	466
A8	ПММА	УНТ	7,0	284	234	518
A9	ПММА	УНТ	9,5	276	318	594
B1	ПП	Al	3,3	305	67	372
B2	ПП	УНТ	2,8	306	94	400
B3	ПП	УНТ	3,1	305	104	409
B4	ПП	УНТ	3,4	304	114	418
B5	ПП	УНТ	3,9	302	131	433
B6	ПП	УНТ	4,8	300	161	461
B7	ПП	УНТ	6,0	296	201	497
B8	ПК	УНТ	7,5	291	251	542
C1	ПК	УНТ	2,9	379	97	476
C2	ПК	УНТ	3,8	375	127	502
C3	ПК	УНТ	5,2	369	175	544
C4	ПК	УНТ	6,3	365	211	576
C5	ПК	УНТ	7,5	361	251	612
C6	ПК	УНТ	8,5	357	285	642
C7	ПК	УНТ	10,0	351	335	686

поверхностей применяется нержавеющая сталь. Сравнительная оценка показывает, что ее стоимость в 2 - 3 раза превышает стоимость разработанных полимерных микро- и нанокомпозитов.

Выводы

1. Для изготовления теплообменных поверхностей различного назначения разработан типоряд полимерных микро- и нанокомпозитов с коэффициентом теплопроводности, изменяю-

щимся от 20 до 60 Вт/(м·К), и максимальной температурой эксплуатации, находящейся в пределах 390...470 К. Исследованы возможности использования в качестве элементов данного типоряда частично кристаллических (полиэтилена, полипропилена, поликарбоната) и аморфного (полиметилметакрилата) полимеров, наполненных углеродными нанотрубками или микрочастицами меди и алюминия.

2. Показано, что при повышении темпера-

туры эксплуатации теплообменного аппарата имеет место тенденция к возрастанию доли наполнителя в соответствующих композиционных материалах. Установлено, что данное обстоятельство наряду с необходимостью применения более дорогостоящих полимерных матриц приводит к увеличению стоимости композитов.

3. Получены температурные зависимости удельной теплоемкости для разрабатываемых полимерных композитов и с их использованием найдены максимальные температуры эксплуатации данных композитов. Показано, что для всех рассматриваемых композиционных материалов на основе частично кристаллических полимеров эта температура не зависит от типа и массовой доли наполнителя и определяется по температуре плавления соответствующих полимеров. Установлено также, что для композитов на основе аморфных полимеров их максимальная температура эксплуатации является функцией типа наполнителя и его концентрации.

4. Выполнены экспериментальные исследования закономерностей изменения коэффициентов теплопроводности для рассматриваемых композиционных материалов. Определены значения первого и второго порогов перколяции, отвечающих образованию из частичек наполнителя соответственно непрерывного перколяционного кластера и перколяционной сетки. Для разработанных композитов на основе частично кристаллических полимеров установлено наличие корреляционной зависимости между степенью кристалличности композиционного материала и его теплопроводящими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Cevallos J. G.* Polymer Heat Exchangers – History, Opportunities and Challenges / Juan Gabriel Cevallos, Arthur E. Bergles, Avram Bar Cohen, Peter Rodgers, Satyandra K. Gupta. – Heat Transfer Engineering. – 2012. – V. 33. – P. 1075–1093.

2. *Jesumathy S.* Experimental study of enhanced heat transfer by addition of CuO nanoparticle / Stella Jesumathy, M. Udayakumar, S. Suresh. – Heat Mass

Transfer. – 2012. – V. 48. – P. 965 – 978.

3. *Wang Q.* A review on application of carbonaceous materials and carbon matrix composites for heat exchangers and heat sinks / Q. Wang, X.H. Han, A. Sommers, Y. Park, C. T Joen, A. Jacobi. – International Journal of Refrigeration. – 2012. – V. 38. – P. 7 – 26.

4. *Yuchun Q.* Experimental Investigation of a Novel Polymeric Heat Exchanger Using Modified Polypropylene Hollow Fibers / Yuchun Qin, Baoan Li, Shichang Wang. – Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2012. – V. 51. – P. 882 – 890.

5. *Elias M.M.* Effect of nanoparticle shape on the heat transfer and thermodynamic performance of a shell and tube heat exchanger. / M.M. Elias, M. Miqdad, I.M. Mahbulul, R. Saidur, M. Kamalisarvestani, M.R. Sohel, Arif Hepbasli, N.A. Rahim, M.A. Amalina. – International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2013. – V. 44. – P. 93 – 99.

6. *Skokov K.P.* Heat exchangers made of polymer – bonded La (Fe,Si)₁₃. / K.P. Skokov, D.Yu. Karpenkov, M.D. Kuz'min, I.A. Radulov, T. Gottschall, B. Kaeswurm, M. Fries, O. Gutfleisch. – Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115. – P. 17A941 – 17A943.

7. *Dengshan Z.* Grain and nanoparticle coarsening of an ultrafine structured Cu–5 vol. 5 Al₂O₃ nanocomposite during isochronal annealing. / Dengshan Zhou, Deliang Zhang, Charlie Kong, Paul Munroe, Rob Torrens. – Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol. 642. – P. 83 – 91.

8. *Берштейн В.А., Егоров В.М.* Дифференциальная сканирующая калориметрия в физикохимии полимеров. – Л.: Химия, 1990. – 256 с.

9. *Долинский А.А.* Теплофизические свойства полимерных микро- и нанокомпозитов на основе поликарбоната / А. А. Долинский, Н. М. Фиалко, Р. В. Динжос, Р. А. Навродская // Промышленная теплотехника. – 2015. – №2. – С.12 – 19.

10. *Долинский А. А.* Влияние методов получения полимерных микро- и нанокомпозитов на их теплофизические свойства / А. А. Долинский, Н. М. Фиалко, Р. В. Динжос, Р. А. Навродская // Промышленная теплотехника. – 2015. – № 4. – С.

5 – 13 .

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE HIGHLY HEAT-CONDUCTING POLYMERIC MICRO-AND NANOCOMPOSITES

Dolinskiy A.A.¹, Fialko N.M.¹, Dinzhos R.V.², Navrodszkaya R.A.¹

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

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

Key words: polymer micro- and nanocomposites, heat transfer surfaces, thermophysical properties,

The results of studies to the develop of the type series of polymer micro- and nanocomposites with thermal conductivity varying from 20 to 60 W/(m·K), and the maximum operating temperature ranging 390...470 K for the manufacture of heat transfer surfaces are presented. The possibility of use as elements this type series of partially crystalline and amorphous polymers (polyethylene, polypropylene, polycarbonate and polimetilmetakrylate) filled with carbon nanotubes or particles of copper and aluminum are considered. The experimental dependence from the temperature of specific heat of the developed composite materials and their conversion into data about values of the maximum operating temperature are given. Research materials to establish patterns of change in thermal conductivity of the developed materials by the mass fraction of fillers are presented.

References 10, fig. 3, tabl. 4.

1. *Cevallos J. G.* Polymer Heat Exchangers – History, Opportunities and Challenges / Juan Gabriel Cevallos, Arthur E. Bergles, Avram Bar Cohen, Peter Rodgers, Satyandra K. Gupta. – Heat Transfer Engineering. – 2012. – V. 33.– P. 1075 – 1093.

2. *Jesumathy S.* Experimental study of enhanced heat transfer by addition of CuO nanoparticle / Stella Jesumathy, M. Udayakumar, S. Suresh // Heat Mass Transfer. – 2012. – V. 48. – P. 965 – 978.

3. *Wang Q.* A review on application of

carbonaceous materials and carbon matrix composites for heat exchangers and heat sinks / Q. Wang, X.H. Han, A. Sommers, Y. Park, C. T Joen, A. Jacobi // International Journal of Refrigeration. – 2012. – V. 38.– P. 7 – 26.

4. *Yuchun Q.* Experimental Investigation of a Novel Polymeric Heat Exchanger Using Modified Polypropylene Hollow Fibers / Yuchun Qin, Baoan Li, Shichang Wang // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2012. – V. 51.– P. 882 – 890.

5. *Elias M.M.* Effect of nanoparticle shape on the heat transfer and thermodynamic performance of a shell and tube heat exchanger/M.M. Elias, M. Miqdad, I.M. Mahbubul, R. Saidur, M. Kamalisarvestani, M.R. Sohel, Arif Hepbasli, N.A. Rahim, M.A. Amalina // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2013. – V. 44.– P. 93 – 99.

6. *Skokov K.P.* Heat exchangers made of polymer– bonded La(Fe,Si)₁₃ / K.P. Skokov, D.Yu. Karpenkov, M.D. Kuz'min, I.A. Radulov, T. Gottschall, B. Kaeswurm, M. Fries, O. Gutfleisch // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115. – P. 17A941 – 17A943.

7. *Dengshan Z.* Grain and nanoparticle coarsening of an ultrafine structured Cu–5 vol.5 Al₂O₃ nanocomposite during isochronal annealing / Dengshan Zhou, Deliang Zhang, Charlie Kong, Paul Munroe, Rob Torrens // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol. 642. – P. 83 – 91.

8. *Bernstein V.A.* Differential Scanning Calorimetry in the physical chemistry of polymers / V.A. Bernstein, V.M. Egorov – L.: Chemistry, 1990. – 256 p. (Rus)

9. *Dolinskiy A.A.* Thermophysical properties of polymer micro- and nanocomposites based on polycarbonate / A.A. Dolinskiy, N.M. Fialko, R.V. Dinzhos, R.A. Navrodszkaya // Industrial heat engineering. – 2015. – №2. – P.12 –19. (Rus)

10. *Dolinskiy A.A.* Influence of methods of preparation of polymeric micro- and nanocomposites on their thermophysical properties / A.A. Dolinskiy, N.M. Fialko, R.V.Dinzhos, R.A. Navrodszkaya // Industrial heat engineering. – 2015. – № 4. – P. 5 – 13.(Rus)

Получено 18.08.2015

Received 18.08.2015

УДК 669.162.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СЛОЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ, ПОДГОТОВЛЕННОЙ К СПЕКАНИЮ

Мных А. С., канд. техн. наук, Яковлева И. Г., докт. техн. наук, Пазюк М. Ю., докт. техн. наук, Овчинникова И.А., канд. техн. наук

Запорожская государственная инженерная академия, пр. Ленина, 226, г. Запорожье, 69006, Украина

В роботі проведено дослідження з встановлення газодинамічного спротиву шару агломераційної шихти різного фракційного складу. Встановлено вплив сегрегації та швидкості фільтрації повітря на газодинаміку шару, що спікається.

В работе проведены исследования по определению газодинамического сопротивления слоя агломерационной шихты различного фракционного состава. Установлено влияние сегрегации и скорости фильтрации воздуха на газодинамику спекаемого слоя.

The paper studied to determine the flow resistance a layer sinter mix of different fractional composition. Identified effect of segregation and the rate of air filtration on the gas dynamics of sintered layer.

Библ. 11, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: газодинамическое сопротивление, агломерационная шихта, фракционный состав.

Введение

Из теории агломерационного процесса известно, что для обеспечения успешного спекания шихты необходимо организовать интенсивное поступление воздуха в зону горения. Минимальная скорость фильтрации воздуха через слой, при которой возможно протекание реакции горения твердого топлива и образование жидкой фазы, должна составлять не менее $0,15 \dots 0,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

Агломерационная шихта относится к сыпучим материалам, состоящим из отдельных частиц, контактирующих друг с другом, между которыми находятся межкусковые каналы или поры. Принято считать, что газ в слое сыпучего материала или обтекает отдельные частицы, либо движется по извилистым, переменного сечения, каналам.

Учитывая сложность и многообразие характеристик стационарного слоя полидисперсного материала, для исследования процессов, протекающих в нем, целесообразно последний рассматривать как однородную массу, на каком-то конечном участке и использовать обобщенные характеристики, такие как порозность, удельная поверхность, коэффициент газодинамического сопротивления.

Анализ исследований и публикаций

Газопроницаемость представляет собой способность элементарного слоя с единичной поверхностью всасывания и высотой пропускать через себя то или иное количество газа в единицу времени, при определенном начальном разрежении под слоем [1].

Исследованиям газодинамики агломерационного слоя посвящена фундаментальная работа Коротича В.И., Пузанова В.П. [2]. Авторами получено двухчленное уравнение напора, в основу которого положено уравнение Дарси-Вейсбаха и коэффициент газодинамического сопротивления. Изложенная методика использована для количественного анализа газодинамического сопротивления различных зон слоя шихты с различным фракционным составом.

По данным Коршикова В.Г. [3], потеря напора газа в слое пропорциональна содержанию в шихте мелких классов – 0,5 мм. Увеличение массовой доли этой фракции от 8 до 24 % сопровождается увеличением перепада давления ΔP с 10 до 40 кПа. На это же значение растет потеря напора при уменьшении среднегармонического диаметра гранул частиц шихты с 4,5 до 3,25 мм.

В работе [4] Фролов Ю.А. предложил упрощенное уравнение для расчета потерь напора газа в слое шихты. Однако, для его использования необходимо проведение трудоемких экспериментов с целью определения эмпирических коэффициентов, учитывающих сопротивление всего слоя, и установления средних за процесс параметров газового потока.

Зависимость для определения потерь напора от высоты слоя, предложенная Петрушовым С.Н. [5], позволяет учесть влияние усадки слоя, частичного разрушения гранул, неравномерности слоя, содержания концентрата в шихте на газодинамику процесса. Автором установлено процентное соотношение влияния каждой составляющей на газодинамическое сопротивление слоя.

Значительное количество работ посвящено установлению влияния сегрегации на газодинамику агломерируемого слоя. Результаты подавляющего большинства исследований показывают, что сегрегация классов крупности шихты положительно влияет на структуру и газопроницаемость слоя [6,7]. Лишь некоторые исследователи отмечают вредное влияние сегрегации на распределение тепла и топлива в слое, а также на его газодинамику [8]. В своих опытах авторы наблюдали переоплавление поверхности слоя в связи с резким увеличением там содержания твердого топлива. В свою очередь, большое количество расплава, тем более в условиях применения внешнего нагрева, существенно снижало газопроницаемость слоя.

В работах [9,10] отмечено, что при создании направленной сегрегации грансостава шихты по высоте слоя обеспечивается повышение прочности агломерата и увеличение производительности агломашин при одновременном сокращении расхода твердого топлива.

Постановка задачи

Анализ публикаций позволил сделать вывод, что газодинамическое сопротивление слоя оказывает значительное влияние на производительность агломерационного процесса и зависит от гранулометрического состава сырой шихты укладываемой на паллеты, ее сегрегации по высоте слоя, от типа применяемого загрузочного устройства. В связи с тем, что отечественные металлургические предприятия переходят на спе-

кание шихты в высоких слоях 500 мм и более, исследование газодинамических характеристик слоя полидисперсной шихты является актуальной научной задачей для контроля и управления работой агломерационных машин.

Таким образом, в работе поставлены следующие задачи:

- установить зависимость коэффициента газодинамического сопротивления от числа Рейнольдса для полидисперсных смесей;
- исследовать влияние скорости фильтрации газа на потери давления в слое;
- проанализировать изменение общего сопротивления слоя от сегрегации шихты.

Изложение результатов исследования

К основным факторам, влияющим на газопроницаемость слоя сыпучих материалов, относятся температура, влияющая на основные параметры газового потока – объем, плотность, вязкость. Исходя из того, что для определения потерь давления в массе сыпучих полидисперсных материалов слой шихты разбивали на участки, данные слои принимались как однородные изотермические.

Наиболее важной газодинамической характеристикой пористого слоя является его сопротивление, которое складывается из сопротивления трения и местных сопротивлений. Доля местных сопротивлений по отношению к общему значительно выше, а при $Re > 2000$, превосходит 95 %, поэтому потери в пористом слое ΔP определялись на основании расчета местных сопротивлений при движении газа по каналам. Для описания потерь давления в слое использована интерпретация общего для всех сыпучих материалов уравнения Дарси-Вейсбаха, описывающего канальное течение газа при наличии трения в канал

$$\Delta P = K_{cl} \frac{\omega^2}{2} \rho (1 + \beta T), \quad (1)$$

где: ω - скорость газового потока, м/с; ρ – плотность газового потока, кг/м³; β – коэффициент объемного расширения газа (0,003661 K⁻¹); T – температура газа, К; K_{cl} – коэффициент, комплексно учитывающий влияние неопределенности форм и размеров пор

$$K_{cl} = 4\psi_{cl} \frac{H}{d_p}, \quad (2)$$

где: Ψ_{cl} – коэффициент газодинамического сопротивления, (Па·м·с²)/кг; H – высота слоя, м; d_3 – эквивалентный диаметр пор, м.

При расчетах потерь давления в реальных условиях использованы экспериментальные значения Ψ_{cl} . Последние получены в условиях лаборатории комбината «Запорожсталь». Опытная установка представляет собой спекательную чашу в виде усеченной пирамиды размером 0,5х0,5х1,2 м, толщина стенок 8 мм, заполненной полидисперсной шихтой, лежащей на колосниковой решетке и эксгаустера, создающего разреже-

ние под слоем.

Предварительно шихта рассеивалась на фракции размером: 3, 3...5, 5...8 и 8 мм. Изначально опыты проводились как с чистыми фракциями, так и с комбинированными попарно. На следующем этапе комбинировались все 4 фракции, их состав в смеси задавался, исходя из того, что определяющей при вычислении сопротивления является фракция 3 мм. Ее количество относительно массы всей смеси изменялось с 10 до 60 %. Изменение остальных составляющих смеси представлено в табл. 1.

Таблица 1. Содержание фракций полидисперсной шихты

№	Фракции, %				d_{cp} , мм
	Ф1(3, мм)	Ф2(3...5, мм)	Ф3(5...8, мм)	Ф4(8, мм)	
1	10	30	30	30	6,3
2	20	20	30	30	6,05
3	25	25	25	25	5,5
4	30	30	30	10	4,6
5	40	25	25	10	4,225
6	50	20	20	10	3,85
7	60	20	10	10	3,35

При проведении экспериментов фильтрующая среда (воздух $T = 20$ °С) проходила в спекательную чашу, просасываясь сквозь слой шихты сверху вниз и по газоходу через эксгаустер выбрасывалась в атмосферу. В процессе работы контролировалась скорость фильтрации среды при помощи анемометра и потери давления в слое для каждого режима эксгаустера. На основе полученных данных рассчитан критерий Рейнольдса и соответствующие ему коэффициенты сопротивления слоя Ψ_{cl}

$$Re = \frac{\omega \cdot d_3}{\nu(T)}, \quad (3)$$

где ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с,

$$d_3 = \mu \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} d_{cp}, \quad (4)$$

где: μ – коэффициент формы частиц шихты (для шара $\mu = 2/3$); ε – порозность слоя, которая в зависимости от типа укладки может быть описана уравнением Слихтера:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \gamma) \sqrt{1 + 2 \cos \gamma}}, \quad (5)$$

где: γ – угол между прямыми, проходящими через центры шарообразных частиц, град.

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \Phi_i}{\sum_{i=1}^n \Phi_i}, \quad (6)$$

где: D_i – средний диаметр i -й фракции, м; Φ_i – содержание i -й фракции в смеси, %; n – количество фракций в смеси.

Коэффициент газодинамического сопротивления слоя Ψ_{cl} , соответствующий числу Re , вычислялся согласно формулы:

$$\Psi_{cl} = \frac{\Delta P d_3}{2H \omega^2 \rho (1 + \beta T)}$$

Результаты исследований сведены в графики критериальных зависимостей для смесей шихты различного фракционного состава, рис. 1, 2.

В работе [11] получено требуемое распределение фракционного состава шихтовых материалов, подготовленных к спеканию в слое высотой

500 мм. Результаты расчетов газодинамического сопротивления по горизонтам данного слоя приведены на рис. 3, 4. Анализ полученных результатов показал, что наравне с сегрегацией гранул по высоте существенное влияние на газодинамику слоя оказывает скорость движения воздуха и фракционный состав исходной шихты.

Следует отметить, что значительный перепад давления в верхнем горизонте слоя, вызванный

повышенной концентрацией (60...80 %) мелкодисперсной (3 мм) окомкованной шихты характерен для сырого слоя без влияния внешнего источника теплоты. При зажигании горном твердого топлива в слое шихты, в ней, за счет испарения влаги, интенсифицируются процессы порообразования, что влечет за собой снижение газодинамического сопротивления верхнего горизонта до 0,55...0,60 кПа.

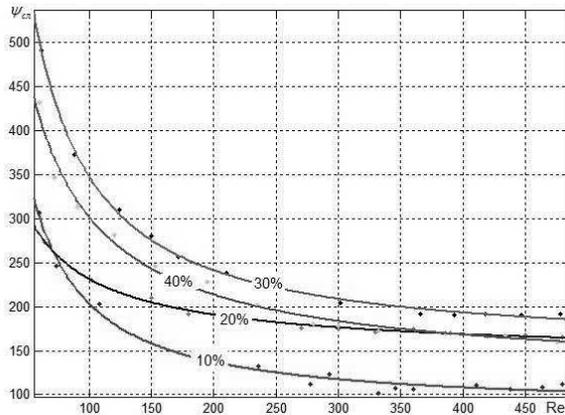


Рис. 1. Зависимость $\psi_{сг} = f(Re)$ для смесей, содержащих 10...40 % фракции 3 мм.

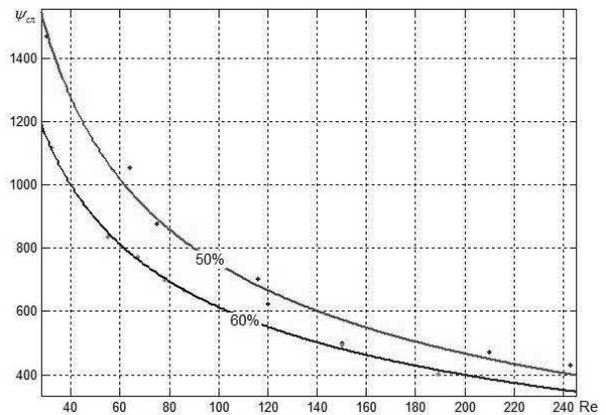


Рис. 2. Зависимость $\psi_{сг} = f(Re)$ для смесей, содержащих 50 и 60 % фракции 3 мм.

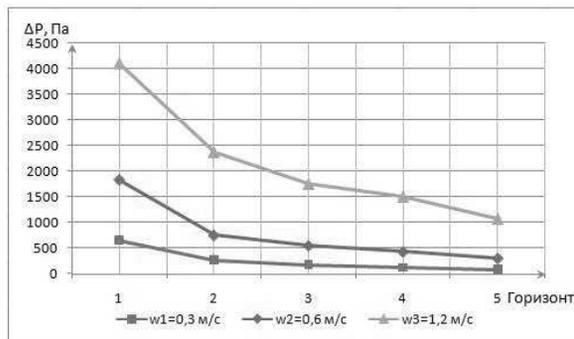


Рис. 3. Влияние скорости фильтрации газа на потери давления в горизонте.

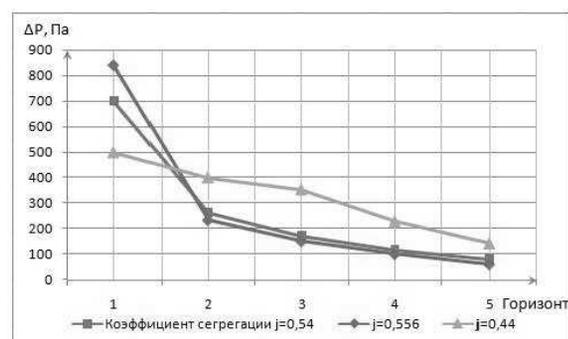


Рис. 4. Влияние сегрегации на потери давления в горизонте.

Особый интерес представляет определение газодинамических характеристик колосников. Сопротивление колосников определяется их состоянием и формой. Под состоянием понимается степень засорения колосника частицами и кусочками шихты. Так, исследования, проведенные в [4], показали, что при реальных параметрах газа в свободной от материала решетке потери давления составляют 40...70 Па, а в рабочих условиях аглофабрик этот показатель составляет 0,11...0,47 кПа. При залипании колосника ме-

лочью потери давления возрастают и достигают значения 0,9...1,0 кПа.

Форма колосников влияет следующим образом: сопротивление ромбических колосников на 20...30 % меньше, чем прямоугольных, а наибольшим сопротивлением обладает полукруглая в верхней части решетка: потери давления в них достигают 3 кПа.

На агломерационных машинах комбината «Запорожсталь» паллеты оборудованы колосниками прямоугольной формы самоочищающейся

конструкции. Это позволило обеспечить потери напора в колосниковом поле на уровне 0,20...0,35 кПа.

В связи с вышеизложенным, необходимо иметь в виду, что величина потерь давления в спекательной тележке отражает газодинамическое состояние слоя с определенной долей погрешности. Значение коэффициента сопротивления слоя, определенного для этого значения потерь давления, будет завышено на 20...30 %.

Для учета влияния на газодинамику спекаемого слоя таких факторов, как усадка слоя, частичное разрушение гранул и т.д., использована следующая зависимость [5]:

$$\Delta P_{\text{сум}} = \Delta P \cdot H + \Delta P_1 (H - 1) + \Delta P_2 (H - 2)^2 + \Delta P_3 (H - 3)^3 + G \cdot H, \quad (8)$$

где: ΔP_1 – сопротивление за счет усадки (0,01...0,05), кПа; ΔP_2 – сопротивление, возникающее при частичном разрушении гранул (0,01...0,03), кПа; ΔP_3 – сопротивление, учитывающее неравномерность изменения структуры слоя по высоте (0,03), кПа; G – коэффициент, характеризующий количество мелкой фракции (3 мм) в шихте (при 20 % мелочи $G = 0$, при 30 % – $G = 1$ и т.д.).

Таким образом, общее газодинамическое

сопротивление спекаемого слоя высотой 500 мм изменяется в зависимости от скорости фильтрации воздуха и фракционного состава шихты и представлено на рис. 5, 6.

Исходя из результатов исследований можно сделать вывод, что увеличение скорости фильтрации воздуха через слой спекаемой шихты пропорционально увеличивает газодинамическое сопротивление слоя и, как следствие, перегружает тягодутьевое оборудование агломерационной машины и увеличивает расход электроэнергии.

Влияние сегрегации не однозначное. При низком значении коэффициента сегрегации прослеживается минимальное падение ΔP в верхнем горизонте 0...100 мм. Однако следует учесть, что при таком распределении фракционного состава не обеспечивается требуемое содержание твердого топлива в верхних слоях шихты, и, как следствие, происходит нарушение теплового режима спекания. При высоком значении j начальный ΔP в верхнем горизонте наибольший за счет концентрации там мелкой фракции, являющейся основным носителем твердого топлива, что позволяет добиться требуемой температуры спекания, а увеличение содержания крупных фракций шихты в нижних горизонтах снижает общие потери давления в слое.

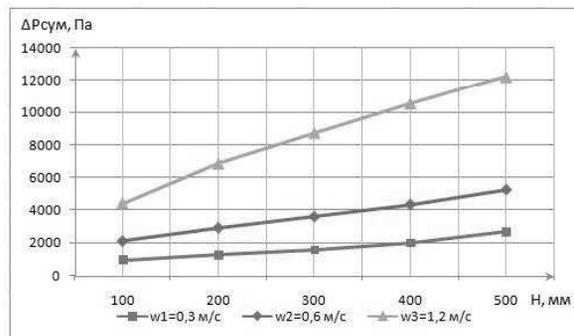


Рис. 5. Изменение газодинамики слоя от скорости фильтрации воздуха.

Выводы

Проведенные исследования по определению потерь давления в массе полидисперсных материалов, подготовленных к спеканию, позволили установить зависимости $\psi_{\text{сл}} = f(\text{Re})$ от фракционного состава шихты.

Определены потери давления в слое высотой

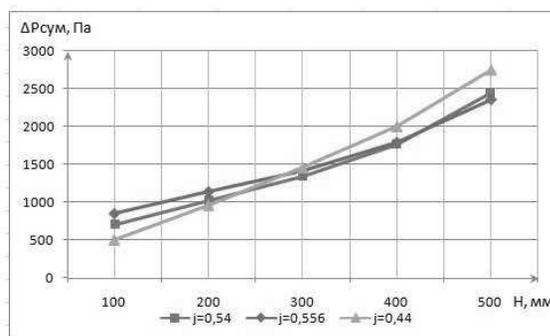


Рис. 6. Изменение общего сопротивления слоя от сегрегации шихты.

500 мм в зависимости от скорости фильтрации воздуха и сегрегации шихтовых материалов по высоте. Установлено, что увеличение скорости фильтрации воздуха от 0,3 до 1,2 м/с, увеличивает газодинамическое сопротивление слоя в 5 раз, а усиление сегрегационных процессов в слое позитивно влияет как на тепловой режим спекания,

так и на газодинамику слоя.

Результаты исследований создают предпосылки к постановке оптимизационной задачи с разработкой алгоритма управления загрузочным устройством агломашин, с целью формирования слоя шихты с минимальным ΔP и требуемым распределением твердого топлива по высоте спекательной тележки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеенко А.А. Оперативное определение газодинамического сопротивления слоя агломерационной машины / А.А. Авдеенко, Ю.Г. Клейн // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1998. – №12. – С.6-10.

2. Коротич В.И. Газодинамика агломерационного процесса / В.И. Коротич, В.П. Пузанов. – М.: Металлургия, 1969. – 206 с.

3. Коршиков Г.В. Влияние строения структурных элементов агломерационной шихты на газодинамическую характеристику спекаемого слоя / Г.В. Коршиков, М.А. Хайков, Н.Н. Должикова // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1983. – №6. – С.12-15.

4. Фролов Ю.А. Анализ газодинамической работы агломерационных машин / Ю.А. Фролов // Сталь. – 2005. – №6 – С. 42-51.

5. Петрушов С. Н. Формирование слоя шихты на агломашине: Курс лекций / С. Н. Петрушов // Алчевск: ДонГТУ. – 2006. – 187 с.

6. Исследование и совершенствование укладки шихты на агломашину / С.Н. Петрушов, А.П. Полухин, Л.М. Рудаков, А.И. Капуста [и др.] // Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса: сборник. – Киев: Наукова думка, 1983. – С.29-33.

7. Matsumura T. Development of new feeding equipment for controlling charge segregation of sinter feed / T. Matsumura, S. Amano, H. Asahara. // Current Advances in Materials and Processes. – 1999. – №4. – P 766.

8. Фролов Ю.А. Исследование сегрегации агломерационных шихт / Ю.А. Фролов, С.Г. Братчиков, Е.Е. Заславский // Сталь. – 1974 – №10. – С. 882-886.

9. Пазюк М.Ю. Исследование сегрегации топлива в слое шихты / М.Ю. Пазюк, В.И. Гранковский // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1982. – №12. – С.6-8.

10. Nakano M. Sintercake Structure Offering High Productivity and High Yield / M. Nakano, T. Kawauchi, S. Kasama. // ICSTI Ironmaking Conference Proceedings. – 1996. – P.183-190.

11. Мных А.С. Определение оптимального распределения твердого топлива в слое загружаемой шихты для выравнивания теплового режима агломерационного процесса / А. С. Мных // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – 2014. – №6. – С. 47-51.

**THE STUDY OF GAS-DYNAMIC
RESISTANCE OF THE LAYER OF
AGGLOMERATION CHARGE,
PREPARED FOR SINTERING**

**Mnyh A.S., Yakovleva I.G., Pazuk M.U.,
Ovchinnikova I. A.**

Zaporozhye state engineering Academy, Lenina 226,
Zaporozhye, Ukraine, 69006.

The paper studied to determine the flow resistance a layer sinter mix of different fractional composition. Identified effect of segregation and the rate of air filtration on the gas dynamics of sintered layer. References 11, table 1, figures 6.

Key words: gas-dynamic resistance, agglomeration charge, fractional composition.

1. *Avdeenko, A.A.* (1998). The operational definition of the gas-dynamic resistance of the layer of sinter machine, *Chernaya Metalurgiya*, №.12, P. 6-10.

2. *Korotich, V.I.* (1969). The dynamics of the agglomeration process, *Metalurgiya*, Moscow 206 p.

3. *Korshikov, G. V.* (1983). The influence of the structure of the structural elements of the agglomeration of the charge on the gas-dynamic characteristics of the sintered layer, *Chernaya*

Metalurgiya, №.6, P. 12-15.

4. *Frolov, U.A.* (2005). Analysis of gas-dynamic operation of sintering machines, *Stal*, No 6, P. 42-51.

5. *Petrushov, S. N.* (2006). Forming a layer of charge on the sintering machine, DonSTU, Alchevsk, 182 p.

6. *Petrushov, S.N.* (1983). The study and improvement of the laying of the charge on the sintering machine, Heat engineering and gas dynamics of the agglomeration process: collection. – Kiev: Naukova Dumka, P. 29-33.

7. *Matsumura, T.* Development of new feeding equipment for controlling charge segregation of sinter feed / T. Matsumura, S. Amano, H. Asahara. // *Current Advances in Materials and Processes*. – 1999. – №4. – 766 p.

8. *Frolov, U.A.* (1974). Investigation of segregation of sinter mix, *Stal*, №.10, P. 82-86.

9. *Pazuk, M.U.* (1982). Investigation of segregation of fuel in the batch blanket, *Chernaya Metalurgiya*, №.12, P. 6-8

10. *Nakano, M.* Sintercake Structure Offering High Productivity and High Yield / M. Nakano, T. Kawauchi, S. Kasama. // *ICSTI Ironmaking Conference Proceedings*. – 1996. – P. 183-190.

11. *Mnyh, A.S.* (2014), Determination of the optimal distribution of the solid fuel layer downloadable charge to align the thermal regime of the sintering process., *Tekhnicheskaya teplofizika I promishlenaya teploenergetika*, №.6, P. 47-51.

Получено 01.09.2015

Received 01.09.2015

УДК 631.563.2: [633.63+631.576.2]:54-162

ВПЛИВ РЕЖИМУ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ НА КРИСТАЛІЧНІСТЬ ПОРОШКІВ З ЯБЛУК ТА ЦУКРОВОГО БУРЯКУ

Михайлик В.А.¹, канд. техн. наук, Снежкін Ю.Ф.¹, член-кореспондент НАН України,
Корінчевська Т.В.¹, Горніков Ю.І.²

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

² Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України, вул. Генерала Наумова 17, Київ, 03164, Україна

Представлено результати дослідження методами дериватографії та рентгенофазового аналізу впливу температури конвективного сушіння на кристалічність порошоків з яблук та цукрового буряку. За допомогою термічного аналізу встановлено, що з підвищенням температури сушіння з 60 до 100 °С, при незмінній швидкості сушильного агента 1,5 м/с, ступінь кристалічності порошоків з буряку знижується з 34,0 до 20,4 %, а порошоків з яблук – з 11,1 до 7,7 %. Рентгенофазовим аналізом ступінь кристалічності бурякових порошоків визначена на рівні 36 %, яблучних – 34 %. За ступенем кристалічності досліджені порошки представляють собою аморфно-кристалічні продукти – суміші біополімерів та розчинних вуглеводів в аморфному стані і кристалічних фаз, переважно глюкози, сахарози та фруктози в порошоків з яблук, чи сахарози в порошоків з цукрового буряку.

Представлены результаты исследования методами дериватографии и рентгенофазового анализа влияния температуры конвективной сушки на кристалличность порошков из яблок и сахарной свеклы. С помощью термического анализа установлено, что с повышением температуры сушки с 60 до 100 °С, при неизменной скорости сушильного агента 1,5 м/с, степень кристалличности порошка из свеклы снижается с 34,0 до 20,4 %, 11,1 % wt. до 7,7 % wt. Рентгено-фазовым анализом степень кристалличности свекольных порошков определена на уровне 36 %, яблочных – 34 %. По степени кристалличности исследованные порошки представляют собой аморфно-кристаллические продукты – смеси биополимеров и растворимых углеводов в аморфном состоянии и кристаллических фаз, преимущественно глюкозы, сахарозы и фруктозы в яблочных порошках или сахарозы в порошках из сахарной свеклы.

The effect of temperature of the convecting drying on the crystallinity of apple and sugar beet powders was presented in this study. The X-ray diffraction and derivatography methods were used. The data of thermal analysis revealed that with increasing of drying temperature from 60 to 100 °C at a constant speed of drying agent (1.5 m/s), the degree of crystallinity was reduced from 34.0 % wt. to 20.4 % wt. and from 11.1 % wt. to 7.7 % wt. for the sugar beet and apple powders, respectively. The X-ray diffraction method showed that the crystallinity of sugar beet and apple powders were 36 % wt. and 34 % wt., respectively. The investigated powders are semicrystalline product according to their degree of crystallinity. E.g., the apple powder is a mixture of amorphous (biopolymers and soluble carbohydrates) and crystalline (glucose, sucrose and fructose) phases.

Бібл. 34, табл. 3, рис. 8.

Ключові слова: сушіння, цукровий буряк, яблука, кристалізація, сахароза, глюкоза, фруктоза, дериватографія, рентгенофазовий аналіз, фазові переходи, ступінь кристалічності.

d – міжплощинна відстань, нм;

F – площа піка плавлення, мВ·с;

$h_{1/2}$ – півширина піка, град;

I – інтенсивність відбиття, с⁻¹;

K – коефіцієнт пересичення розчину (соку) сахарозою;

m – маса, кг;

N – ступінь кристалічності, %;

Q – інтегральна теплота плавлення, кДж;

q – коефіцієнт перерахунку площі піка плавлення в теплоту, кДж (мВ·с)⁻¹;

t – температура, °С;

T_g – температура склопереходу;

W – вологовміст, %;

ΔH – питома теплота плавлення, кДж·кг⁻¹;

θ – кут падіння-відбиття пучка рентгенівського випромінювання, град.

Верхній індекс:

60 – 60 °С;

80 – 80 °С;

100 – 100 °С.

Нижній індекс:*cr* – кристалічна фаза;*f* – кінець плавлення;*gl* – глюкоза;*deg* – початок термічного розкладання (деградація);*d.s* – сухі речовини;*dta* – диференціальний термічний аналіз;**Вступ**

В останній час все більше висушених овочів і фруктів одержують в порошкоподібному вигляді, через зручність їх використання в хлібопекарному та кондитерському виробництві, в виробництві продуктів швидкого приготування та ін. Основні параметри сушіння залежать від хімічного складу сировини. Наявність в ній біологічно активних речовин та розчинних вуглеводів потребують корегування процесу сушіння з врахуванням особливостей їх біо- та фізико-хімічних властивостей. При розгляді процесів, що відбуваються при сушінні фруктів і овочів, головну увагу приділяють фазовим переходам і механізмам переносу води, збереженню харчових властивостей продукту та енергетичній ефективності сушіння. Нажаль, мало приділяється уваги фазовим перетворенням, що відбуваються за участю основних розчинених компонентів соку: глюкози, фруктози та сахарози. Завдяки високій гідратаційній спроможності ці вуглеводи в основному зумовлюють вологоутримуючі та кріопротекторні властивості рослинних тканин [1 – 5]. Сировина з високим вмістом моно- та дисахаридів особливо важко зневоднюється на завершальному етапі сушіння [6], що призводить до зниження загальної енергетичної ефективності процесу. Причиною є те, що зневоднюванню в основному підлягає сік, кількість якого в овочах і фруктах в середньому становить 91...92 % до маси сировини. В процесі сушіння концентрація соку неухильно зростає, досягаючи при певному вологовмісті критичного пересичення, що спонукає до криста-

i – початок плавлення;*ref* – еталонна речовина;*xrd* – рентгенофазовий аналіз;*s* – концентрація насичення;*sug* – сахароза;*int* – інтегральна інтенсивність відбиття;**Скорочення:**

ДТА – диференціальний термічний аналіз;

ДТГ – диференціальна термогравіметрія;

РФА – рентгенофазовий аналіз;

Т – температура;

ТГ – термогравіметрія.

лоутворення. Через високу в'язкість концентрованих соків видалення води з внутрішніх шарів рослинних тканин ускладнене. Випаровування здійснюється з зовнішнього шару, що призводить до локального зростання коефіцієнта пересичення і, як результат, до утворення кристалічного шару (кірки), який може замикає розчин. Видалення води з замкнутих об'ємів відбувається або в результаті мікрровибухів, при різкому зростанні тиску всередині об'єму, або дифузійним шляхом, що значно подовжує час сушіння.

Швидкість утворення кристалічної фази вуглеводів і її масове зростання в нечистих розчинах, якими є соки, залежить від виду цукру, температури, коефіцієнту пересичення розчину, концентрації нецукрів та швидкості зневоднення [7]. Якщо швидкість зневоднення перевищує швидкість кристалізації, зростає коефіцієнт пересичення розчину і разом з прискоренням росту основної маси кристалів утворюються нові центри кристалізації [8].

Фазовий склад висушених продуктів, дисперсність гідрофільних компонентів та вологість визначають гігроскопічність, умови диспергування, сепарації та зберігання. За наявності аморфних компонентів та зв'язаної води, яка виконує роль пластифікатора, в тканинах ягід [9 – 11], фруктів [12 – 15] та овочів [16] з низькою вологістю спостерігаються процеси склування/розсклування (фазові переходи другого роду) при подоланні температури склопереходу T_g . Підвищення температури матеріалу з такою вологістю вище T_g призводить до розсклування:

тверде тіло переходить в еластичний стан, який унеможливує ефективне його диспергування та сепарацію. Охолодження нижче T_g викликає зворотній процес – склування, в результаті якого матеріал знову набуває властивостей твердо-го тіла. Дослідники продовжують обговорювати використання факту склування в прогнозуванні мікробіологічних, фізичних та хімічних змін в продукті, що відбуваються в процесі обробки та зберігання. Продукт може бути стабільним при зберіганні нижче температури склопереходу у зв'язку з значним зниженням активності води, від величини якої залежать мікробіологічні та хімічні процеси [14].

В зв'язку з цим дослідження формування фазового стану основних компонентів рослинної сировини з різним складом та вмістом розчинних вуглеводів при сушінні має не тільки науковий, а і вагомий практичний інтерес.

Матеріали та методи

Матеріали. В дослідженні були використані яблука та цукровий буряк. Яблука сорту «Делікатес» були зірвані в кінці вересня 2014 року в саду ІТТФ НАН України, м. Київ. Цукрові буряки вирощені в с. Гребінка Київської обл. та викопані в жовтні 2014 року.

В ході підготовки до сушіння з яблук та кореню цукрового буряку був видалений зовнішній шар. Паренхімні тканини яблука та буряку нарізали смужками довжиною 40...50 мм і поперечним розрізом 3x3 мм.

Для порівняння температур та теплоти фазових перетворень в порошках з яблук була використана глюкоза харчова (ГОСТ 975-88).

Методи. Сушіння здійснювали на експериментальному конвективному стенді [17] за температури сушильного агента (повітря) 60, 80 та 100 °С і швидкості – 1,5 м/с. Смужки досліджуваних матеріалів розташовували одним шаром вповодж напрямку руху повітря на відстані 3 мм одна від одної на ситову підкладку, яку встановлювали на тримач електронних ваг в камері вимірювання [18]. Маса зразків знаходилась в межах 20...26 г.

Термічні дослідження проводили в дериватографі «Q-1000» системи Paulik-Paulik-Erdey (фірма «МOM», Угорщина) [19] в діапазоні 20...250 °С при швидкості нагрівання 3,6 К/хв.

Зразки розміщували в відкритий конічний платиновий тигель. В якості інертної речовини в тиглі порівняння використовували оксид алюмінію. Корекцію шкали температур здійснювали по температурі плавлення бензойної кислоти (122,4 °С) [20]. Відхилення температури не перевищувало $\pm 0,5$ К. Збір та обробка інформації з дериватографа здійснювались за допомогою прикладної комп'ютерної програми «Derivatograph», створеної в середовищі програмування Delphi [21].

Рентгенофазовий аналіз (РФА) порошоків з яблука та цукрового буряку виконували на дифрактометрі ДРОН-4-07 в відфільтрованому нікелем Cu K_α випромінюванні аноду та геометрії зйомки по Бреггу-Брентано [22].

Результати досліджень та аналіз одержаних даних

Необхідно відмітити, що матеріал для дослідження був вибраний свідомо. За хімічним складом яблука суттєво відрізняються від кореня цукрового буряку (таблиця 1) [23, 24]. Основною відмінністю є вміст сухих речовин та склад розчинних вуглеводів. Загальний вміст розчинних вуглеводів залежить від сорту, умов і місця вирощування, періоду збирання та зберігання. В яблуці основну частину розчинних вуглеводів складають моносахариди – фруктоза (~ 6,0 %) і глюкоза (~ 2,4 %), вміст дисахариду сахарози становить лише ~ 2,0 %. В зрілому корені цукрового буряку, навпаки, сахароза є основним компонентом сухих речовин, її вміст складає біля 70 %, а глюкоза та фруктоза відсутні. Вміст соку в цукровому буряку і яблуках становить ~ 91...92 %.

Процес сушіння зразків відображений кривими сушіння та швидкості сушіння на рис. 1. Для можливості порівняння швидкостей сушіння вологовміст в координатах «швидкість – вологовміст» представлено безрозмірною величиною. Видно, що при рівних умовах сушіння, через значну різницю в вихідних значеннях вологовмісту, швидкість зневоднення яблучних тканин вища за швидкість зневоднення тканин цукрового буряку.

Під час нарізання сировини перед сушінням частина клітин механічно пошкоджується, причому в результаті поширення механічної деформації ушкодження зазнають клітини не тільки поверхневого шару, що полегшує їх

зневоднення [25]. Цей факт, а також прогрів матеріалу, відображаються на кривих швидкості сушіння в вигляді різкого її зростання, яка, досягнувши максимуму, спадає практично лінійно. В неушкоджених клітинах елементарні об'єми соку залишаються ізольованими один від одного поки захисні властивості оболонки (протоплазми) клітин не будуть втрачені в результаті дії темпе-

ратури та зневоднення. Температура денатурації протоплазми залежить від видової належності сировини і здебільше поріг денатурації білка протоплазми рослинних клітин знаходиться в районі 60 °С. Так протоплазма кореня цукрового буряку денатурує в інтервалі 60...70 °С [24].

Таблиця 1. Усереднений вміст (г) основних компонентів в яблуках та коренях цукрового буряку, в 100 г продукту

Вода	Моносахариди	Дисахариди	Геміцелюлоза	Клітковина	Пектинові речовини	Білки	Жири	Органічні кислоти	Зола
Яблука									
84,4	8,4	2,0	-	2,1	1,0	0,4	0,4	0,8	0,5
Цукровий буряк									
75,0	0,1	17,5	1,1	1,2	2,5	0,7	0,03	0,47	0,6

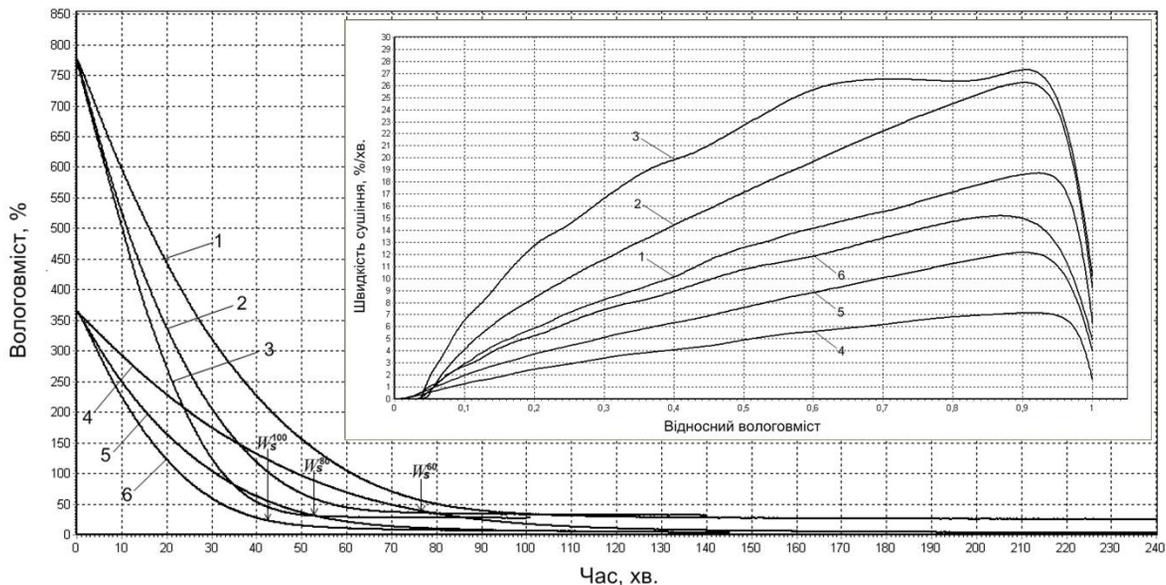


Рис. 1. Кінетика та швидкість сушіння паренхімних тканин яблука (1, 2, 3) та цукрового буряку (4, 5, 6) при температурі: 60 (1, 4), 80 (2, 5) та 100 °С (3, 6). Швидкість сушильного агента 1,5 м/с.

При конвективному сушінні температура матеріалу залишається нижчою температури сушильного агента і досягає його температури лише в кінці процесу зневоднення. Тобто при сушінні до денатурації протоплазми сік і його компоненти залишаються зосередженими в клітинах. Кристалізація компонентів соку, відносно яких розчин набуває насичення, розпочинається на

зовнішній поверхні тканин в розірваних клітинах, з яких видалення води проходить в першу чергу і з найвищою швидкістю (рис. 1). В пересичений розчин цих клітин центри кристалізації можуть бути внесені з повітря [7].

Не вдаючись у тонкощі механізму перенесення вологи в рослинних тканинах при сушінні можна припустити, що у міру зневод-

нення матеріалу і зростання коефіцієнту пересичення кристалізація з периферійної частини переміщується в глибоку тканину.

Використовуючи залежності розчинності сахарози від температури [26] та гідратації тканин цукрового буряку від вологості [4], були розраховані значення вологовмісту тканин W_s , при якому концентрація сахарози в соку досягає насичення за 60, 80 та 100 °С: $W_s^{60} = 38,60\%$, $W_s^{80} = 30,65\%$ та $W_s^{100} = 22,78\%$. Отримані величини W_s дають можливість за кінетичними кривими сушіння (рис. 1) визначити час τ , після досягнення якого розчин стає пересиченим відносно сахарози. В умовах сталої швидкості сушильного агента τ залежить від температури сушіння: $\tau^{60} = 76,4$ хв.; $\tau^{80} = 52,8$ хв.; $\tau^{100} = 42,6$ хв.

Подальше зневоднення призводить до ще більшого концентрування соку, ступінь якого може бути оцінена видимим коефіцієнтом пересичення K , що представляє собою відношення вмісту сахарози (г / г води) в соку до вмісту са-

харози за тієї ж температури в чистому насиченому розчині [26] (рис. 2).

Таке зростання коефіцієнту пересичення можливе лише в випадку, коли процес кристалізації не запущений. Відомо, що початок гомогенної кристалізації неможливо передбачити і, що спонтанна кристалізація сахарози у відсутності центрів кристалізації може розпочинатись при дуже високому пересиченні розчину [7]. В цукровій промисловості рекомендованою величиною для утфелю другої кристалізації з чистотою 82...87% є $K = 1,30...1,35$, що дає можливість підтримувати максимальну швидкість кристалізації, не допускаючи вторинного кристалотворення [7]. Кристалізація сахарози в тканинах буряку з чистотою соку 88...89% скоріш за все буде відбуватись при $K > 1,35$. Враховуючи температурну залежність розчинності сахарози, межа метастабільної зони буде подолана при вологовмісту тканин $W \leq 28,54, 22,62$ та $16,76\%$ за температури 60, 80 та 100 °С, відповідно.

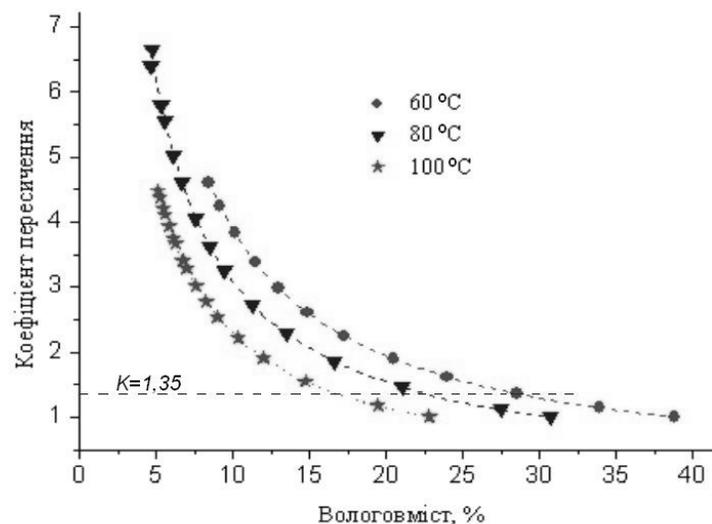


Рис. 2. Очікувана зміна коефіцієнту пересичення соку під час сушіння тканин цукрового буряку за умови відсутності кристалізації сахарози.

Швидкість кристалізації з підвищенням температури сушіння зростає через більш стрімке наростання коефіцієнту пересичення, зменшення в'язкості соку та позитивний вплив температури на дифузійну та кристалохімічну стадії процесів росту кристалів [7].

При безперервному і інтенсивному зневодненні міжкристалного розчину концентрація його стрімко наростає, збільшується

в'язкість, ускладнюється процес дифузії сахарози до зростаючих кристалів, чистота міжкристалного розчину погіршується, в результаті чого швидкість кристалізації падає. Настає період, коли швидкість зневоднення значно перевищує швидкість кристалізації, сахароза не встигає викристалізуватись і утворює аморфну масу.

Дослідження порошків цукрового буряку ме-

тодом дериватографії показало, що плавлення сахарози відбувається в інтервалі 170...195 °С (рис. 3, крива ДТА, рис. 6, криві 4, 5 та 6). Температури максимумів піків плавлення знаходяться в діапазоні температур плавлення сахарози, отриманих в роботі [27]. Площа (затемнена) F_{sug} , що обмежена піком плавлення та лінією, яка з'єднує точки початку плавлення t_i і його завершення t_f пропорційна інтегральній теплоті плавлення сахарози Q_{sug} . Температуру t_f

визначали в точці злому висхідної кривої ДТА піка плавлення, яка розділяє процеси плавлення та термічної деструкції порошку. Порівнюючи t_f з температурою початку термічного розкладання порошку t_{deg} (рис. 3, крива ДТГ) бачимо, що термічна деградація порошку починається ще до закінчення плавлення сахарози. Накладання цих двох процесів призводить до незначного зменшення величини Q_{sug} .

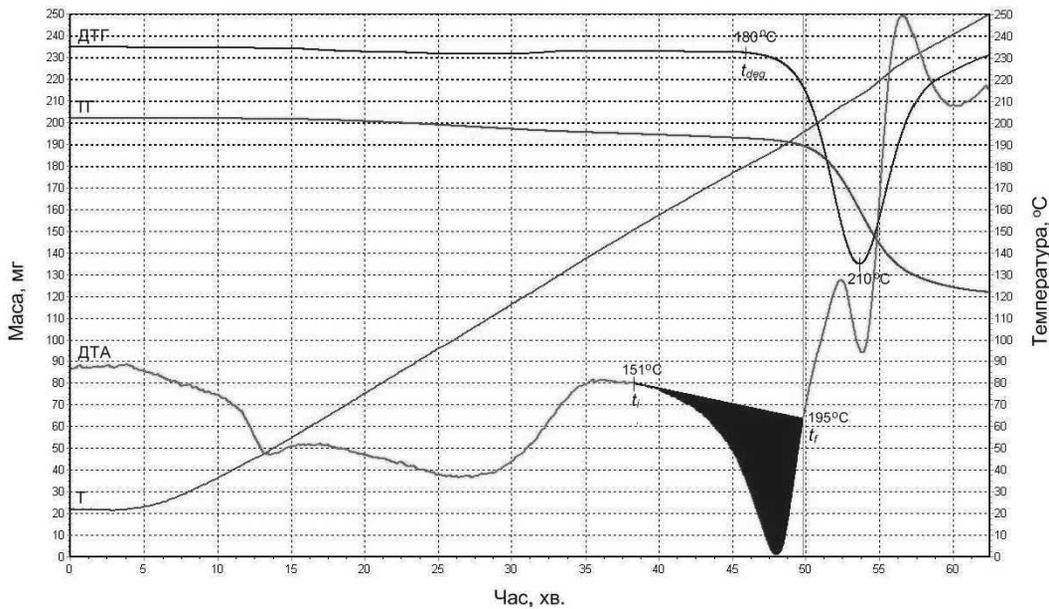


Рис. 3. Дериватограма порошку, отриманого з кореня цукрового буряку після сушіння при 60 °С. Маса зразка 202,0 мг.

Температура сушіння не впливає на t_f сахарози, тоді як t_i зростає з підвищенням температури: $t_i^{60} = 151$ °С; $t_i^{80} = 160$ °С; $t_i^{100} = 170$ °С (рис. 3). Таке переміщення t_i може бути наслідком відмінності чистоти та дисперсного складу кристалів сахарози, утвореними в різних умовах зростання пересичення розчину [7, 28].

Інтегральну теплоту плавлення сахарози визначали за результатами градування ДТА дериватографа за допомогою стеаринової кислоти ($\Delta H_{ref} = 198,9$ Дж г⁻¹) – еталонної речовини, що використовується при калібруванні приладів ДТА та ДСК [29]:

$$Q_{sug} = (m_{ref} \Delta H_{ref} F_{sug}) / F_{ref} \quad (1)$$

Масу кристалічної сахарози в порошках розраховували, приймаючи питому теплоту плавлення сахарози $\Delta H_{sug} = 111,4$ Дж г⁻¹ [27]:

$$m_{sug} = Q_{sug} / \Delta H_{sug} \quad (2)$$

Звісно, дериватографія не може конкурувати з калориметрією і досягнути високої точності в визначенні теплоти ендо- чи екзотермічних реакцій в дериватографі «Q-1000» неможливо, проте в даному випадку, при дотриманні незмінних умов проведення дослідів можливо отримати оцінювальні результати на досить хорошему рівні. Так, відхилення у визначенні коефіцієнту перерахунку площі піка плавлення в теплоту плавлення $q = (m_{ref} \Delta H_{ref}) / F_{ref}$ за результатами плавлення стеаринової кислоти ($q = 0,02546$ Дж мВ⁻¹ с⁻¹) та ангідридної частини харчової глюкози ($q = 0,02647$ Дж мВ⁻¹ с⁻¹) не перевищувало 3,81 %. Похибка в визначенні q по результатам градування стеариновою кислотою склала 0,51 %.

Порівнюючи кількість кристалічної сахарози в сухих речовинах (ступінь кристалічності) порошоків з буряку, бачимо, що її вміст залежить від температури сушіння (рис. 4). Чим вища температура сушіння, тим менше сахарози переходить в кристалічний стан. За температури сушильного агента 60 °С кристалічну фазу утворює тільки половина сахарози, що знаходиться в соку. В результаті підвищення температури

до 100 °С вміст кристалів сахарози зменшується до 20,3 %. Видно, що використані режими сушіння не збалансовані щодо швидкості зневоднення з кінетикою кристалізації сахарози. Масова кристалізація сахарози не поспіває за темпом зневоднення і значна її частина утворює тверду аморфну фазу. Таку сахарозу можна розглядати як переохолоджену рідину в скловидному стані [30].

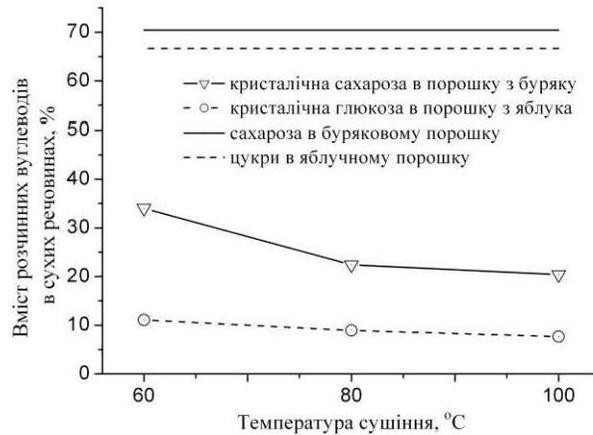


Рис. 4. Залежність вмісту кристалічних сахарози в порошках з цукрового буряку і глюкози в порошках з яблук від температури сушіння та загальний вміст цукрів в порошках.

На відміну від цукрового буряку в соку яблука знаходяться фруктоза, глюкоза та сахароза. Найвищу розчинність має фруктоза. В 100 г води при 55 °С розчиняється 740,32 г фруктози, 261,7 г глюкози та 273,0 г сахарози [26]. В літературі відсутні дані про взаємний вплив на розчинність цукрів в чотирьох компонентній системі вода-сахароза-глюкоза-фруктоза. Проте є відомості [31] про розчинність в системі вода-фруктоза-глюкоза, де показано, що з підвищенням температури розчинність глюкози в присутності фруктози і розчинність фруктози в присутності глюкози зростає. Визначити за кінетичними кривими сушіння значення вологовмісту тканин, при яких досягається насичення соку відносно трьох розчинених в ньому вуглеводів, практично неможливо. Отже, в процесі сушіння паренхімних тканин яблук в кристалічний стан з різною чистотою можуть переходити всі розчинені в соку цукри. Виходячи з їх розчинності, можна передбачити, що при зневодненні паренхімних тканин яблук спочатку утворюються кристалічні фази глюкози та сахарози і тільки під кінець сушіння

кристалізується фруктоза. Стійкою кристалічною формою глюкози вище 50 °С є безводна α -D-глюкоза, фруктоза кристалізується в вигляді β -D-фруктопіранози [26].

Дериватографічні дослідження яблучних порошоків (рис. 5, криві ДТГ та ДТА, рис. 6, криві 1, 2 та 3) показали, що при нагріванні зразків в інтервалі 20...179,1 °С спостерігається декілька ендотермічних процесів. До 121...124 °С одночасно протікають дегідратація порошку та плавлення β -D-фруктози (102...104 °С [20]), а в інтервалі 134,1...179,1 °С – плавлення глюкози. Температура сушіння не вплинула на t_i глюкози, тоді як t_f зменшується зі збільшенням температури сушіння: $t_f^{60} = 179,1$; $t_f^{80} = 177,1$; $t_f^{100} = 171,6$ °С. Після завершення плавлення глюкози реєструються екзотермічні процеси прискореної термічної деструкції термолабільних компонентів порошку (рис. 5, криві ДТА та ДТГ), теплота яких компенсує теплопоглинання при плавленні сахарози, що відображається на кривій ДТА в інтервалі 179,1...200 °С. В зв'язку

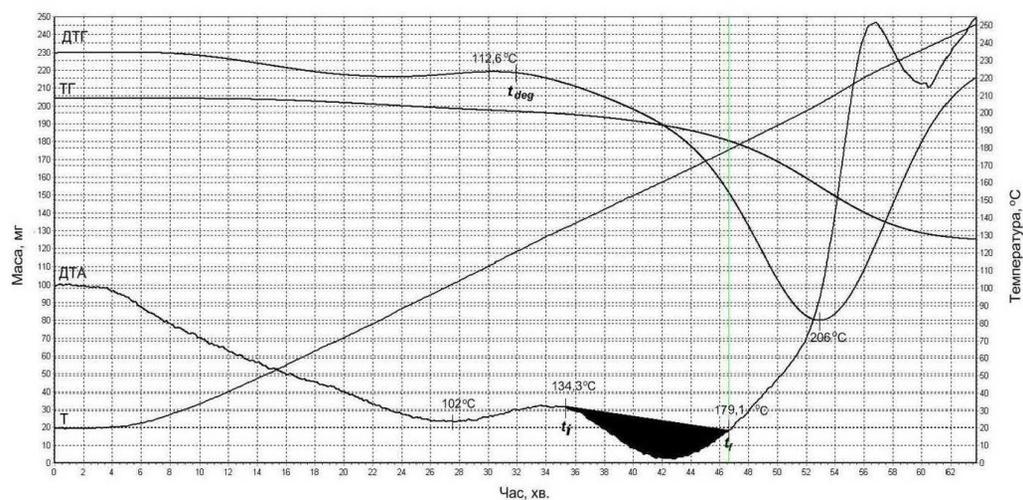


Рис. 5. Дериватограма порошку, отриманого з паренхімних тканин яблука після сушіння при 60 °C. Маса зразка 204,0 мг.

з сумісним протіканням процесів визначити теплоту плавлення фруктози та сахарози не представляється можливим.

Максимуми температури піків плавлення глюкози в порошках співпадають з максимумом піка плавлення безводної частини гідратної α -D-глюкози (рис. 6, крива 7) та максимумами піків плавлення, отриманих методом ДСК [27] для безводної D(+)-глюкози фірми «Fluka BioChemica» – 151,9 та 159,4 °C і фірми «BDH, AnalR» – 154,8 та 163,1 °C, при швидкостях сканування 2 та 10 К/хв., відповідно. Проведена ідентифікація дозволяє стверджувати, що зареєстровані піки плавлення в порошках яблук відповідають кристалічній фазі α -D-глюкози. Вміст кристалічної глюкози визначали аналогічно визначенню кристалічної сахарози в порошках з буряку. Масу кристалів розраховували за формулою (2), використовуючи значення питомої теплоти плавлення ангідридної α -D-глюкози ($\Delta H_{gl} = 187,1 \text{ Дж г}^{-1}$) [27]. Результати вимірювань, розрахунків та визначення ступеня кристалічності порошків наведені в таблиці 2.

З отриманих даних видно, що близько 72 % глюкози яблук переходить в кристалічний стан при температурі сушіння 60 °C. Підвищення температури сушильного агента до 100 °C призводить до збільшення швидкості зневоднення (рис. 1, криві 1, 2 та 3), скорочення часу пе-

ребування розчину в метастабільному стані, стрімкого зростання коефіцієнту пересичення та, як і при сушінні тканин цукрового буряку, до зменшення ступеня кристалічності порошку N_{dta} . Необхідно мати на увазі, що N_{dta} розраховано тільки по вмісту глюкози в кристалічному стані. Тобто величина N_{dta} , отримана дериватографічним методом, явно занижена – в ній відсутні вклади кристалічних фаз фруктози та сахарози, визначити які по теплоті плавлення не вдалося.

Як видно з дериваторам (рис. 3 та 5) досліджені порошки суттєво відрізняються за термічною стійкістю. В порошках з цукрового буряку $t_{deg} = 180 \text{ °C}$, максимальної швидкості термічне розкладання набуває при 210 °C. В яблучних порошках через присутність фруктози деструкція починається з 120...122 °C, досягаючи максимальної швидкості при 205...207 °C. Цей факт дає підставу вважати, що отримані методом дериватографії величини N_{dta} яблучних порошків дещо занижені.

Одночасно з дериватографічними дослідженнями ступінь кристалічності порошків визначали методом РФА. Дифрактограми порошків з яблук та буряку, отриманих з паренхімних тканин за різних температур сушіння, представлені на рис. 7 та 8. На дифрактограмах спостерігаються три розширених максимуми, які частково перекриваються.

Таблиця 2. Результати вимірювань та розрахунків ступеня кристалічності порошоків по даним ДТА

Показник	Температура сушіння, °С					
	60	80	100	60	80	100
	Порошок з цукрового буряку			Порошок з яблук		
Маса зразка, мг	202,0	201,8	204,0	204,0	203,4	199,2
Маса сухих речовин, $m_{d.s}$, мг	194,5	195,9	196,7	196,7	197,6	193,5
Вологість, % мас.	3,72	2,92	3,58	3,58	2,85	2,86
Інтегральна теплота плавлення, Q , Дж	7,37	4,89	4,45	4,09	3,30	2,78
Маса кристалічної фази, m_{cr} , мг	66,17	43,91	39,95	21,85	17,64	14,85
Ступінь кристалічності, $N_{dta} = m_{cr} / m_{d.s}, \%$	34,0	22,4	20,3	11,1	8,9	7,7

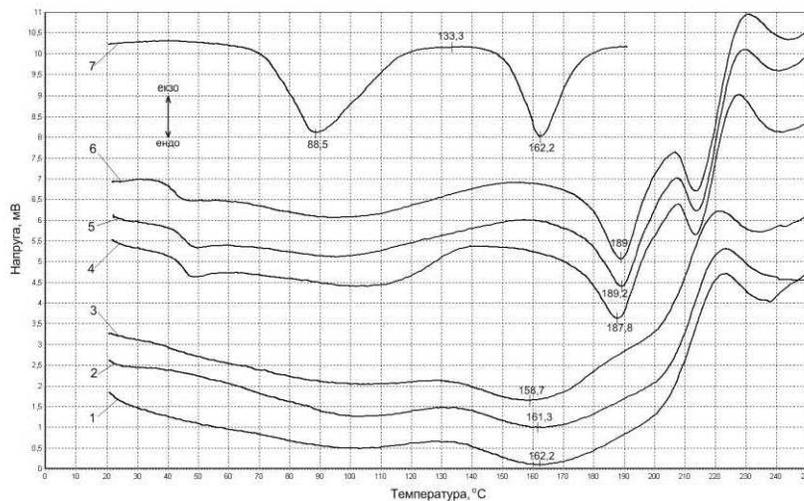


Рис. 6. Криві ДТА порошоків з паренхімних тканин яблук (1, 2, 3), кореня цукрового буряку (4, 5, 6), одержаних після сушіння при 60 (1, 4), 80 (2, 5) і 100 °С (3, 6) та гідратної глюкози (4).

В таблиці 2 наведені характеристики дифракційних піків, що отримані в результаті математичного розкладання піків з використанням апроксимуючої форми піка функції Гауса.

Значення міжплощинних відстаней d характеризують середні величини відстаней між ланцюгами або їх частинами органічних молекул досліджуваних продуктів. Півширину піків $h_{1/2}$ можна співвіднести зі ступенем кристалічності областей з таким упорядкуванням. Співвідношення інтегральних інтенсивностей піків I_{int} корелює з співвідношенням об'ємів речовини з періодичністю, яка характеризується відповідною міжплощинною

відстанню [22].

Аналіз отриманих даних показує, що зміна температури сушіння від 60 до 100 °С не призводить до суттєвих змін структури висушених продуктів, тому на рисунках 7 (б) та 8 (б) представлено розкладання дифрактограм порошоків з тканин, висушених тільки при 60 °С.

Результати рентгенофазового аналізу свідчать про неоднорідність структури порошоків і наявність областей з різним ступенем кристалічності з характерними для них параметрами періодичності (міжплощинними відстанями). До більш кристалічних областей можна віднести ті, в яких параметри періодичності складають 0,5...0,4 нм для порошоків

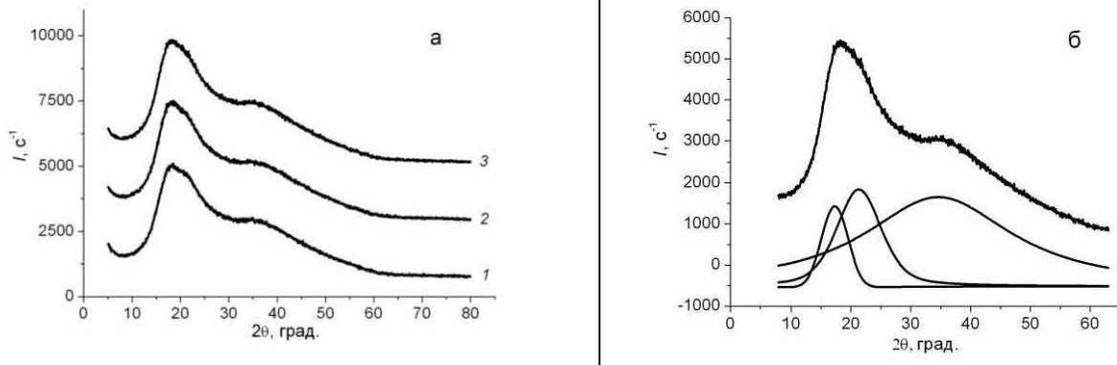


Рис. 7. Дифрактограми порошків з яблук (а), одержаних з паренхімних тканин, висушених при 60 (1), 80 (2) та 100 °С (3). Розкладання дифрактограми (1) (б).

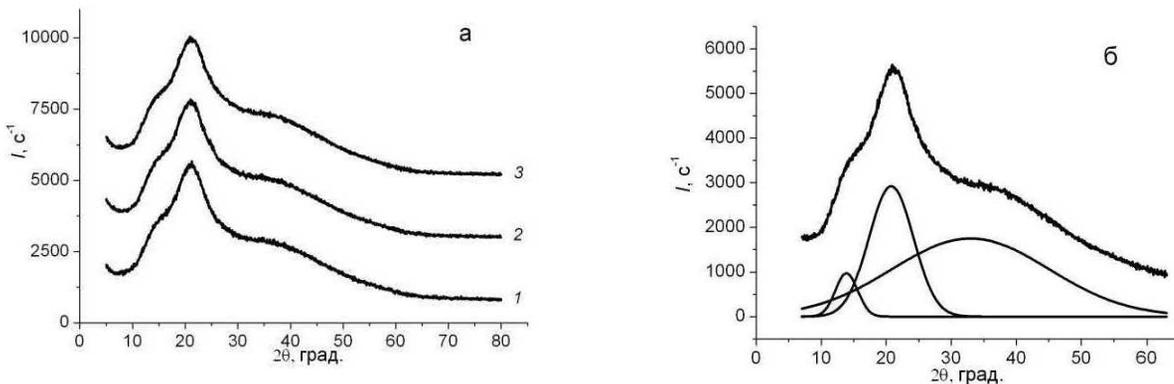


Рис. 8. Дифрактограми порошків з цукрового буряку, одержаних з тканин, висушених (а) при 60 (1), 80 (2) та 100 °С (3). Розкладання дифрактограми (1) (б).

з яблук і 0,6...0,4 нм для порошків з буряку. Півширина перших двох піків знаходиться в межах 4...8 град. До менш кристалічних або аморфних відносяться ті області, в яких параметр періодичності складає 0,25...0,27 нм для обох продуктів, півширина третього піку досягає 28...29 град. Таким чином порошки можна віднести до частково кристалічних продуктів і визначити ступінь кристалічності N_{xrd} за методом Метьюза [32], як відношення площі під кристалічними піками до загальної площі під дифракційними кривими в інтервалі кутів дифракції 10...60 град. В таблиці 2 отримані значення представлені параметром I_{int} в %. Тобто ступінь кристалічності порошку N_{xrd} визначається як сума величин I_{int} першої та другої дифракційних ліній. З огляду на розраховані величини I_{int} ступінь кристалічності порошків з яблук становить 33,81 %, а порошків з цукрового буряку –

36,28 %. Відсутність видимої залежності ступеню кристалічності порошків від температури сушіння може бути пов'язане з малою чутливістю методу порошкової рентгенографії до внутрішньомолекулярних змін в високомолекулярних органічних сполуках.

Порівнюючи величини ступеня кристалічності (таблиці 2 та 3), одержані методами дериватографії (N_{dta}) та РФА (N_{xrd}), бачимо, що вони близькі для порошку, отриманого з тканин цукрового буряку після сушіння при 60 °С. Невелика різниця (~2 %) в значеннях N_{dta} та N_{xrd} можлива за рахунок впливу теплоти термічної деструкції термолабільних компонентів на теплоту плавлення сахарози. Певний вклад в величину N_{xrd} порошків (особливо яблучних) вносять і органічні кислоти, розчинність яких значно нижча [33], а швидкість кристалізації вища за таку для вуглеводів [34].

Таблиця 3. Характеристики дифракційних відбиттів порошоків з яблука та цукрового буряку (сушіння при 100 °С) та ступінь кристалічності

Порошок	№ лінії	2θ , град.	d , нм	$h_{1/2}$, град.	I_{int} , відносні одиниці	I_{int} , %	N_{xrd} , %
Яблучний	1	17.29	0.51	5.17	7181.41	10.08	33,81
	2	21.33	0.42	8.81	16896.59	23.73	
	3	34.61	0.26	29.74	47128.72	66.18	
Буряковий	1	13.9	0.64	4.01	2912.53	5.26	36,28
	2	20.75	0.43	8.06	17160.70	31.02	
	3	32.95	0.27	28.51	35244.39	63.71	

РФА дає значно вищі значення N_{xrd} для порошоків з яблук. Цей факт є ще одним доказом присутності в яблучних порошках крім глюкози кристалічних фаз сахарози та фруктози, визначити вміст яких методом дериватографії не вдалося. Розрахунок показує, що навіть якби глюкоза та сахароза повністю перейшли в кристалічний стан, то різниця між ступенем кристалічності яблучних порошоків N_{xrd} за даними РФА і сумою часток глюкози та сахарози в сухих речовинах яблук складе біля 6 %. Отже, враховуючи визначену методом дериватографії ступінь кристалічності яблучних порошоків N_{da} та очікувану, орієнтуючись на величину ступеня кристалічності порошку з цукрового буряку, долю кристалічної сахарози, вміст кристалічної фруктози в сухих речовинах порошоків буде значно вищим за 6 %.

Висновки

Дослідження впливу режиму конвективного сушіння на кристалічність порошоків з яблук та цукрового буряку, проведені методами дериватографії та рентгенофазового аналізу, показали, що термічний метод аналізу виявився більш чутливим до змін вмісту кристалічної фази.

Методом диференціального термічного аналізу встановлено, що:

- температура сушіння через зміну швидкості сушіння та кристалізації впливає на ступінь кристалічності отриманого продукту;

- з підвищенням температури сушіння з 60 до 100 °С, при незмінній швидкості сушильного агента 1,5 м/с, ступінь кристалічності

порошку з буряку знижується з 34,0 до 20,4 %, а порошку з яблук – з 11,1 до 7,7 %;

- ступінь кристалічності залежить від хімічного складу сировини і визначається, в основному, вмістом моно- та дисахаридів в ній;

Враховуючи негативний вплив температури сушіння на кристалічність продукту, пов'язаний зі зростанням швидкості сушіння, можна припустити, що збільшення швидкості сушильного агента, призведе до аналогічного результату. Інтенсифікація процесів сушіння рослинної сировини з високим вмістом моно- та дисахаридів призводить до зниження ступеню кристалічності сухого продукту.

Рентгенофазовим аналізом ступінь кристалічності порошоків з буряку визначена на рівні 36 %, з яблук – 34 %, проте залежності ступеню кристалічності порошоків від зміни режиму сушіння виявити не вдалось.

Виходячи з рівня кристалічності, можна стверджувати, що досліджені порошки представляють собою аморфно-кристалічні продукти – суміші біополімерів та розчинних вуглеводів в аморфному стані і кристалічних фаз, переважно глюкози, сахарози та фруктози в порошках з яблук, чи сахарози в порошках з цукрового буряку.

Кількість аморфної фази з ростом температури та швидкості сушіння зростає. Зростання вмісту цукрів в аморфному стані підвищує гігроскопічність порошоків, особливо з високим вмістом фруктози, та збільшує вірогідність прояву фазових переходів другого роду.

Утворення кристалічних фаз вуглеводів

протікає на завершальному етапі сушіння в розчинах з надто високим коефіцієнтом пересичення і супроводжується виділенням теплоти, інтегральна величина якої прямо залежить від маси кристалів та температури кристалізації [3].

Проведені дослідження показали, що фазові перетворення вуглеводів в сировині з високим вмістом моно- та дисахаридів необхідно враховувати в теоретичних розрахунках та теплових балансах процесу сушіння.

ЛІТЕРАТУРА

1. Михайлик В.А., Давыдова Е.О., Манк В.В. Исследование гидратации сахарозы методом низкотемпературной сканирующей калориметрии // Термодинамика органических соединений. – Горький, 1989. – С. 76–80.
2. Михайлик В.А. Калориметрические исследования сахаров и сахаросодержащих материалов // Промышленная теплотехника. – 1998. – Т. 20, № 1. – С. 25–31.
3. Михайлик В.А. Применение термических методов исследования в решении научных и производственных задач энергоэффективности // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій, Міністерство освіти і науки України. – Одеса, 2007. – Вип. 31, Т.1. – С. 170–177
4. Михайлик В.А., Давыдова Е.О. Исследование состояния воды в сахаросодержащем растительном сырье при его обезвоживании // Промышленная теплотехника. – 2000. – Т. 22, № 5-6. – С. 50–54.
5. Михайлик В.А., Снежкин Ю.Ф. Влияние низких температур на состояние паренхимных тканей сахарной свеклы // Промышленная теплотехника. Приложение к журналу. – 2003. – Т. 25, № 4. – С. 169–171.
6. Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов. – Москва: Пищепромиздат, 1960. – 683 с.
7. Герасименко А.А. Кристаллизация сахара. – Киев: Наукова думка, 1965. – 316 с.
8. Попов В.Д., Бажал И.Г. Кинетика уваривания сахарных уфелей // Известия высших учебных заведений. Пищевые технологии. – 1961. – № 2. – С. 136–143.
9. Roos Y.H. Effect of moisture on the thermal behavior of strawberries studied using differential scanning calorimetry // Journal of Food Science. – 1987. – Vol. 52(1). – P. 146–149.
10. Khalloufi S., El-Maslouhi Y., Ratti C. Mathematical model for prediction of glass transition temperature of fruit powders // Journal of Food Science. – 2000. – Vol. 65(5). – P. 842–848.
11. Wang H., Zhang S., Chen, G. Glass transition and state diagram for fresh and freeze-dried Chinese gooseberry // Journal of Food Engineering. – 2008. – Vol. 84. – P. 307–312.
12. Moraga G., Marti'nez-Navarrete N., Chiralt A. Water sorption isotherms and phase transitions in kiwifruit // Journal of Food Engineering. – 2006. – Vol. 72. – P. 147–156.
13. Fabra M.J., Talens P., Moraga G., Marti'nez-Navarrete N. Sorption isotherm and state diagram of grapefruit as a tool to improve product processing and stability // Journal of Food Engineering. – 2009. – Vol. 90. – P. 52–58.
14. Mrad N.D., Bonazzi C., Boudhrioua N., Kechaou N., Courtois F. Moisture Sorption Isotherms, Thermodynamic Properties, and Glass Transition of Pears and Apples // Drying Technology. – 2012. – Vol. 30. – P. 1397–1406.
15. Mikhailik V.A., Dmitrenko N.V., Snezhkin Yu.F. Change in the Specific Heat Capacity of Parenchymal Tissues of Apples due to Dehydration // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2014. – Vol. 87, № 1. – P. 48–53.
16. Goula A.M., Karapantsios T.D., Achilias D.S., Adamopoulos K.G. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp // Journal of Food Engineering. – 2008. – Vol. 85(1). – P. 73–83.
17. Михайлик В.А., Хавін С.О., Реус І.А. Експериментальне дослідження кінетики сушіння ріпчастої цибулі // Енергетика, економіка, технології, екологія. – 2006. – № 2(19). – С. 74–78.
18. Михайлик В.А., Снежкін Ю.Ф., Михайлик Т.О. Дослідження кінетики сушіння Na⁺-заміщеної форми бентонітової глини (Черкаське родовище) // Кераміка: наука и жизнь. – 2009. – № 3(5). – С. 4–11.
19. Паулик Ф., Паулик Й., Эрдеи Л. Дериватограф. Теоретические основы // Венгерский оптический завод. – Будапешт, 1974. – 146 с.
20. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий хими-

ческий справочник ; ред. В. А. Рабинович. – 2-е изд., испр. и доп. – Л.: Химия. Ленинградское отделение, 1978. – 392 с.

21. Михайлик В.А., Снежкин Ю.Ф., Белинский В.Т. Применение дериватогафа для исследования влияния предварительной термической обработки на кинетику сушки растительного сырья // Проблемы промышленной теплотехники: IV Междунар. конф., 26–30 сент. 2005г. : тезисы докл. – К., 2005. – С. 349–350.

22. Зевин Л.С., Завьялова Л.Л. Количественный рентгенографический фазовый анализ. – М.: Недра, 1974. – 183 с.

23. Количество углеводов в яблоках [Электронный ресурс] // Notefood 2015. Журнал о правильном питании. Пищевые вещества [сайт] – Режим доступа: <http://notefood.ru/pishhevyyeveshhestva/uglevody/kolichestvo-uglevodov-v-yabloke.html>

24. Силин П.М. Технология сахара – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Пищевая промышленность, 1967. – 624 с.

25. Основные факторы, влияющие на процесс экстрагирования сахарозы из свеклы [Электронный ресурс] // Информационный портал Пищевик [сайт] – Режим доступа: <http://mppnik.ru/publ/1203-osnovnye-factory-vliyayuschie-na-process-ekstragirovaniya-saharozy-iz-svekly.html>

26. Принципы технологии сахара : Пер. с англ. / Под ред. П. Хонига. – М.: Пищепромиздат, 1961, – 616 с.

27. Hurtta M., Pitkanen I., Knuutinen J. Melting

behaviour of D-sucrose, D-glucose and D-fructose // Carbohydrate Research. – 2004. – № 339. – P. 2267–2273.

28. Шестак Я. Теория термического анализа: Физико-химические свойства твердых неорганических веществ : Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 456 с.

29. Уэндланд У. Термические методы анализа: Пер. с англ. / Под ред. В.А. Степанова и В.А. Берштейна. – М.: Мир, 1978. – 526 с.

30. Переохлаждена рідина [Электронный ресурс] // Вікіпедія. Вільна енциклопедія [сайт] – Режим доступа: http://uk.wikipedia.org/wiki/Переохлаждена_рідина

31. Ивчук Н.П., Бобровник Л.Д., Танащук Л.И., Назарова О.П., Скрипник В.Ф. Растворимость глюкозы и фруктозы в системе вода – фруктоза – глюкоза // Сахарная промышленность. – 1994. – №2. – С. 30.

32. Липатов Ю.С., Шилов В.В., Гомза Ю.П., Кругляк Н.Е. Рентгенографические методы изучения полимеров. – Киев: Наукова думка, 1982. – 296 с.

33. Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч У.Ф. Краткий справочник по химии. – 4-е изд., испр. и доп. – Киев: Наукова думка, 1974. – 991 с.

34. Кристаллизация и свойства кристаллических веществ : сборник научных трудов // Академия наук СССР, Кольский филиал им. С.М. Кирова ; отв. ред. С. М. Бондин. – Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1971. – 97 с.

IMPACT OF THE MODE OF CONVECTIVE DRYING ON THE CRYSTALLINITY OF APPLE AND SUGAR BEET POWDERS

Mykhailyk V.A.¹, Snezhkin Yu.F.¹,
Korinchevska T.V.¹, Gornikov Yu.I.²

¹ Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Zhelyabova Str., Kyiv, 03680, Ukraine

² Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine, 17 General Naumov Str., Kyiv, 03164, Ukraine

The effect of temperature of the convecting drying on the crystallinity of apple and sugar beet powders was presented in this study. The X-ray diffraction and derivatography methods were used. The data of thermal analysis revealed that with increasing of drying temperature from 60 to 100 °C at a constant speed of drying agent (1.5 m / s), the degree of crystallinity was reduced from 34.0 % wt. to 20.4 % wt. and from 11.1 % wt. to 7.7 % wt. for the sugar beet and apple powders, respectively. The X-ray diffraction method showed that the crystallinity of sugar beet and apple powders were 36 % wt. and 34 % wt., respectively. The formation of crystalline phases of carbohydrates occurs only at the final stage of drying in the solutions with a very high coefficient of supersaturation. The investigated powders are semicrystalline product according to their degree of crystallinity. E.g., the apple powder is a mixture of amorphous (biopolymers and soluble carbohydrates) and crystalline (glucose, sucrose and fructose) phases. References 34, tables 3, figures 8.

Key words: drying, sugar beet, apple, crystallization, sucrose, glucose, fructose, derivatography, X-ray diffraction, phase transitions, the degree of crystallinity.

1. *Mykhailyk V.A., Davydova E.O., Mank V.V.* Study of hydration of sucrose by low-temperature scanning calorimetry // *Termodinamika organicheskikh soedineniy*. – Gorky, 1989. – P. 76–80. (Rus.)

2. *Mykhailyk V.A.* Calorimetric studies of sugars

and sugar-containing materials // *Promyshlennaya teplotekhnika* – 1998. – Vol. 20, № 1. – P. 25–31. (Rus.)

3. *Mykhailyk V.A.* The application of thermal methods of research in solving scientific and industrial problems of energy efficiency // *Naukovi pratsi Odes'koyi national'noyi akademiyi kharchovykh tekhnolohiy*, Ministerstvo osvity i nauky Ukrayiny. – Odessa, 2007. – Issue 31, Vol. 1. – P. 170–177. (Rus.)

4. *Mykhailyk V.A., Davydova E.O.* Study of the state of water in the sugar-containing vegetable raw materials during its dehydration // *Promyshlennaya teplotekhnika* – 2000. – Vol. 22, № 5–6. – P. 50–54. (Rus.)

5. *Mykhailyk V.A., Snezhkin Yu.F.* Influence of low temperature on the condition of parenchymal tissues of sugar beet // *Promyshlennaya teplotekhnika. Prilozheniye k zhurnal*. – 2003. – Vol. 25, № 4. – P. 169–171. (Rus.)

6. *Ginzburg, A.S.* Drying of the foodstuffs. – Moscow: Pishchepromizdat, 1960. – 683 p. (Rus.)

7. *Gerasimenko A.A.* Crystallization of the sugar. – Kiev: Naukova dumka, 1965. – 316 p. (Rus.)

8. *Popov V.D., Bazhal I.G.* Kinetics of boiling of sugar massecuite // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevye tekhnologii*. – 1961. – № 2. – P. 136–143. (Rus.)

9. *Roos Y.H.* Effect of moisture on the thermal behavior of strawberries studied using differential scanning calorimetry // *Journal of Food Science*. – 1987. – Vol. 52(1). – P. 146–149.

10. *Khalloufi S., El-Maslouhi Y., Ratti C.* Mathematical model for prediction of glass transition temperature of fruit powders // *Journal of Food Science*. – 2000. – Vol. 65(5). – P. 842–848.

11. *Wang H., Zhang S., Chen, G.* Glass transition and state diagram for fresh and freeze-dried Chinese gooseberry // *Journal of Food Engineering*. – 2008. – Vol. 84. – P. 307–312.

12. *Moraga G., Marti'nez-Navarrete N., Chiralt A.* Water sorption isotherms and phase transitions in kiwifruit // *Journal of Food Engineering*. – 2006. – Vol. 72. – P. 147–156.

13. *Fabra M.J., Talens P., Moraga G., Marti'nez-Navarrete N.* Sorption isotherm and state diagram of grapefruit as a tool to improve product processing and stability // *Journal of Food Engineering*. – 2009. – Vol. 90. – P. 52–58.

14. *Mrad N.D., Bonazzi C., Boudhrioua N., Kechaou N., Courtois F.* Moisture Sorption Isotherms, Thermodynamic Properties, and Glass Transition of Pears and Apples // *Drying Technology*. – 2012. – Vol. 30. – P. 1397–1406.
15. *Mikhailik V.A., Dmitrenko N.V., Snezhkin Yu.F.* Change in the Specific Heat Capacity of Parenchymal Tissues of Apples due to Dehydration // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2014. – Vol. 87, № 1. – P. 48–53.
16. *Goula A.M., Karapantsios T.D., Achilias D.S., Adamopoulos K.G.* Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp // *Journal of Food Engineering*. – 2008. – Vol. 85(1). – P. 73–83.
17. *Mykhailyk V.A., Havin S.O., Reus I.A.* Experimental study of the drying kinetics of bulb onion // *Enerhetyka, ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya*. – 2006. – №2 (19). – P. 74–78. (Ukr.)
18. *Mykhailyk V.A., Snezhkin Yu.F., Mykhailyk T.O.* Study of drying kinetics of Na⁺-substituted form of bentonite clay (Cherkasy field) // *Keramika nauka i zhizn'*. – 2009. – №3 (5). – P. 4–11. (Ukr.)
19. *Paulik F., Paulik J., Erdei L.* Derivatograph of the system. Theoretical foundations // *Vengerskyi optisheskyi zavod*. – Budapesht, 1974. – 146 p. (Rus.)
20. *Rabinovich V.A., Havin Z. Ya.* A brief chemical handbook; edited by V.A. Rabinovich. – 2nd edition, corr. and add. – L.: Khimia, Leningradskoe otdelenie, 1978. – 392 p. (Rus.)
21. *Mykhailyk V.A., Snezhkin Yu.F., Belinsky V.T.* Application of derivatograph for research of influence of preliminary heat treatment on the kinetics of drying vegetable raw materials // *Problemy promyshlennoy teplotekhniki*: IV Intern. conf., Sept. 26-30. 2005. : abstracts. – K., 2005 – P. 349 – 350. (Rus.)
22. *Zevin L.S., Zavyalova L.L.* Quantitative radiographic phase analysis. – M.: Nedra, 1974. – 183 p. (Rus.)
23. *The quantity of carbohydrates in apples* [A electronic resource] // *Notefood 2015. Zhurnal o pravil'nom pitanii. Pishchevye veshchestva* [website] – Access: <http://notefood.ru/pishhevyeveshchestva/uglevody/kolichestvo-uglevodov-v-yabloke.html> (Rus.)
24. *Silin P.M.* Technology of sugar – 2nd edition, revised and added. – M.: Pishchevaya promyshlennost', 1967. – 624 p. (Rus.)
25. *The main factors influencing the process of extracting sucrose from beet* [A electronic resource] // *Informatsionnyy portal Pishchevik* [website] – Access: <http://mppnik.ru/publ/1203-osnovnyefactory-vliyayuschie-na-process-ekstragirovaniyasaharozy-iz-svekly.html> (Rus.)
26. *Principles of technology of sugar*: Trans. from English / Ed. P. Honig. – M.: Pishchepromizdat, 1961 – 616 p. (Rus.)
27. *Hurtta M., Pitkanen I., Knuutinen J.* Melting behaviour of D-sucrose, D-glucose and D-fructose // *Carbohydrate Research*. – 2004. – № 339. – P. 2267–2273.
28. *Shestak Ya.* Theory of thermal analysis: physical and chemical properties of inorganic solids : Trans. from English. – M.: Mir, 1987. – 456 p.
29. *Wendland W.* Thermal Methods of Analysis : Trans. from English / Ed. V.A. Stepanov and V.A. Berstein – M.: Mir, 1978. – 526 p. (Rus.)
30. *Supercooled fluid* [Electronic resource] // *Wikipedia. The Free Encyclopedia* [website] – Access: http://uk.wikipedia.org/wiki/Переохолоджена_рідина (Ukr.)
31. *Ivchuk N.P., Bobrovnik L.D., Tanaschuk L.I., Nazarova O.P., Skripnik V.F.* The solubility of glucose and fructose in the water–fructose–glucose system // *Sakharnaya promyshlennost'*. – 1994. – № 2. – P. 30. (Rus.)
32. *Lipatov Yu.S., Shilov V.V., Gomza YU.P., Kruglyak N.E.* Radiographic methods of studying polymers. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 296 p. (Rus.)
33. *Goronovsky I.T., Nazarenko Yu.P., Nekryach U.F.* A brief handbook on chemistry. – 4th edition, corr. and add. – Kiev: Naukova dumka, 1974. – 991 p. (Rus.)
34. *The crystallization and properties of crystalline substances*: collection of scientific papers // *Academy of Sciences of the USSR, the Kola branch of them. SM Kirov; Ans. Ed. S.M. Bondin*. – L.: Nauka, Leningradskoe otdelenie, 1971. – 97 p. (Rus.)

Получено 17.06.2015

Received 17.06.2015

УДК 66.047

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ СУХОЇ ФОРМИ ГІДРОЛІЗОВАНОГО БІЛКОВОГО ПРОДУКТУ МЕТОДОМ РОЗПИЛЮВАННЯ

Шаркова Н.О., канд. техн. наук, **Турчина Т.Я.**, канд. техн. наук, **Жукотський Е.К.**

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

Вивчено вплив температурних режимів розпилювального сушіння на вихід порошку з сушильної камери та його характеристики.

Изучено влияние температурных режимов распылительной сушки на выход порошка из сушильной камеры и его характеристики.

An influence of temperature regimes of spray drying on the powder yield from the drying chamber and its characteristics are studied.

Бібл. 3, рис. 3, табл. 2.

Ключові слова: гідролізовані білкові продукти, розпилювальне сушіння, температура теплоносія, вихід порошку.

$T_{вх}$ – температура теплоносія на вході в камеру;
 $T_{вих}$ – температура теплоносія на виході з камери;
 $W_{кін}$ – кінцева вологість висушеного порошку;

β – кут природного укосу;
 $\delta_{сер}$ – середній лінійний розмір часток порошку;
 ρ – насипна густина порошку.

Сучасні інноваційні рішення в галузі технічної теплофізики дозволили вперше в Україні створити технологію отримання нового гідролізованого білкового продукту спеціального дієтичного призначення для застосування при важких захворюваннях, пов'язаних з білковою недостатністю.

Виробництво такого продукту у порошковій формі, зручній для використання та тривалого зберігання, вимагає наукового обґрунтування раціональних теплотехнологічних параметрів його одержання на розпилювальних сушарках з урахуванням його фізико-хімічних властивостей. Необхідність таких досліджень обумовлена впливом властивостей кожного висушеного матеріалу на кінетику його сушіння та міцнісні властивості висушених часток, які визначають:

- структурно-механічні характеристики порошку і вільний вихід його з сушильної камери;
- кінцеву вологість та гігроскопічні характеристики порошку, від яких залежать умови та термін його зберігання;
- відновлювальну здатність, зокрема, розчинність [%] порошку, що служить одним з показників якості готового продукту.

Дослідження кінетики сушіння крапель водних розчинів білкових сумішей з різним співвідношенням білків рослинного та тваринного походження, які проводились на експериментальному стенді в потоці теплоносія на системі «крапля-парогазове середовище» [1], дали можливість оцінити геометричні, морфологічні, термопластичні і адгезійні характеристики висушених часток в потоці теплоносія і після їх охолодження до 40...20 °С [2, 3]. Було встановлено, що:

- завдяки термостійкості матеріалу доцільно застосовувати температури теплоносія більше 180 °С, що дозволяє покращити умови висушування часток порошку за рахунок підвищення паропровідних властивостей їх структурованого поверхневого шару і скоротити час їх сушіння у 1,5 рази;
- збереження цілісності часток в процесі багаторазового інтенсивного їх роздування в стадії кипіння свідчить про високі міцнісні властивості матеріалу і зниження вірогідності утворення дрібнодисперсної фракції порошку та втрат його з відпрацьованим теплоносієм в умо-

вах сушарки;

- підвищення монолітності висушених часток сприяє покращенню структурно-механічних характеристик порошку і дозволяє збільшити його загальний вихід з камери сушарки.

Мета роботи – визначення раціональних теплотехнологічних параметрів процесу сушіння для збільшення виходу порошку гідролізова-

ного білкового продукту з камери розпилювальної сушарки та забезпечення його високої якості.

Дослідження проводились на експериментальній розпилювальній сушарці (рис. 1) прямооточного типу з сушильною камерою циліндроконічної форми діаметром 1,3м, верхнім підводом теплоносія і продуктивністю до 10 кг/год по випареній волозі [1].



Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної розпилювальної сушарки (ІТТФ НАН України).

Підготовлені партії водного розчину гідролізованого білкового продукту з певним співвідношенням білкових складових та вмістом сухих речовин, наведених в роботі [3], подавались на відцентровий дисковий розпилювач розпилювальної сушильної установки за допомогою плунжерного насосу у режимі постійного перемішування.

З урахуванням результатів досліджень кінетики сушіння крапель розчину гідролізованого білкового продукту було запропоновано процес його розпилювального висушування здійснювати при температурах теплоносія на вході в камеру вище 180 °С. Для проведення досліджень були обрані температурні режими, наведені в таблиці 1.

Після виходу температури теплоносія на

вказані режими (табл. 1) в камеру подавався водний розчин гідролізованого білкового продукту, де він висушувався до стану сухого порошку і в складі двофазного потоку пневмотранспортом спрямовувався до циклону для його сепарації та вивантаження до приймальної ємності. По завершенні досліду внутрішні поверхні сушильної камери обстежувались на наявність відкладень порошку або адгезійних налипів.

Так, в умовах I температурного режиму процесу сушіння на стінках камери осідав порошок, який при простукуванні частково осипався, а в зоні дискового розпилювача налипав, в результаті чого загальний вихід порошку з камери складав < 90 %, як видно на рис. 2.

За умов II і III режимів процесу сушіння основна маса порошку своєчасно надходила до

приймальної ємності. Решта порошку, що осідав на стінки камери, легко осипався при періодичному її простукуванні. По завершенні процесу сушіння стінки камери були чисті, а вихід порошку складав ~95 % (рис. 2).

Дослідні партії порошоків гідролізованного білкового продукту були досліджені за показниками кінцевої вологості та структурно-механічними характеристиками (табл. 2).

Табл. 1. Діапазони температур теплоносія на вході в камеру розпилювальної сушарки та її виході при сушінні водного розчину гідролізованного білкового продукту

Температурні режими сушіння					
I		II		III	
$T_{вх}, ^\circ\text{C}$	$T_{вих}, ^\circ\text{C}$	$T_{вх}, ^\circ\text{C}$	$\epsilon m T_{вих}, ^\circ\text{C}$	$T_{вх}, ^\circ\text{C}$	$T_{вих}, ^\circ\text{C}$
≤ 185	≤ 82	≤ 190	≤ 87	≤ 195	≤ 92

Табл. 2. Характеристика дослідних партій порошоків гідролізованного білкового продукту, отриманих за різних температурних режимів процесу розпилювального сушіння

Режими сушіння	Зовнішній вигляд порошку	Вологість порошку $W_{кін}, \%$	Кут природного укусу, β°	Насипна густина ρ , кг/м^3	Середній розмір часток порошку $\delta_{ср}, \text{мкм}$
I	Білий, схильний до грудкування та відкладень	4,5	35	300	16
II	Білий, однорідний, сипкий	4,0	37	280	12
III	Жовтішого відтінку, однорідний, сипкий	3,8	38	270	10

Дослідження показали, що отримані партії порошоків, запакованих у двошарові поліетиленові пакети, при зберіганні у сухому прохолодному місті без доступу світла не втрачають своїх структурно-механічних характеристик до 1 року за виключенням порошку, отриманого за умов I температурного режиму (табл. 2), який проявляв схильність до грудкування.

Аналіз показників кінцевої вологості $W_{кін}$ та кута природного укусу β° (табл. 2) дослідних партій порошоків показав, що підвищення температурних режимів сушіння до 190...195 $^\circ\text{C}$ (III режим) сприяє зниженню вологості до 3,8 % та покращенню сипкості порошку, про що свідчить збільшення його виходу (рис. 2).

Враховуючи високу ступінь дисперсності отриманих порошоків гідролізованного білкового продукту (δ_m) та їх низьку насипну густина (ρ) (табл. 2), характерну для порошоків знежирених білкових продуктів, отриманих методом

розпилювання, важливо відзначити, що для покращення сепараційних властивостей порошку доцільно вміст сухих речовин у вихідному розчині гідролізованного білкового продукту, що подається в розпилювальну сушарку, збільшити у 2-3 рази.

На рис. 2 наведені гістограми виходу з сушильної камери дослідних партій порошку гідролізованного білкового продукту, аналіз яких у сукупності із даними табл. 2 показує, що підвищення температурних режимів процесу розпилювального сушіння сприяє збільшенню виходу продукту з сушарки. Проте, зайве підвищення температурних режимів процесу сушіння негативно впливає на якісні характеристики порошку, як це відбулось з порошком, отриманим за умов III режиму, про що свідчить його більш жовтіший відтінок (табл. 1) та зниження відсотку його розчинності (рис. 3).

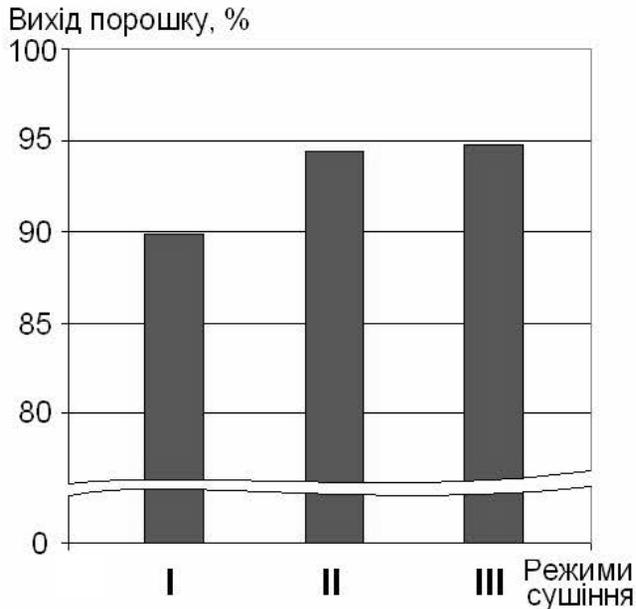


Рис. 2. Гістограми загального виходу порошкового білкового продукту з розпилювальної сушарки за різних температурних режимів сушіння.

Таким чином, найбільший вихід сухої форми гідролізованного білкового продукту з сушарки та найкращі його характеристики забезпечуються за умов саме II температурного режиму процесу сушіння, який можна вважати раціональним для умов експериментальної розпилювальної сушарки.

За встановленими теплотехнологічними параметрами на даній експериментальній розпилювальній сушарці були проведені роботи по напрацюванню дослідних партій сухої форми гідролізованного білкового продукту. Отриманий порошковий продукт досліджувався за фізико-хімічними, органолептичними та мікробіологічними характеристиками, які у подальшому були використані при розробці технічних умов на промислове виробництво сухої форми даного продукту.

Висновки

Результатами досліджень по отриманню сухої форми гідролізованного білкового продукту на експериментальній розпилювальній сушарці підтверджена доцільність проведення процесу його сушіння при температурах теплоносія

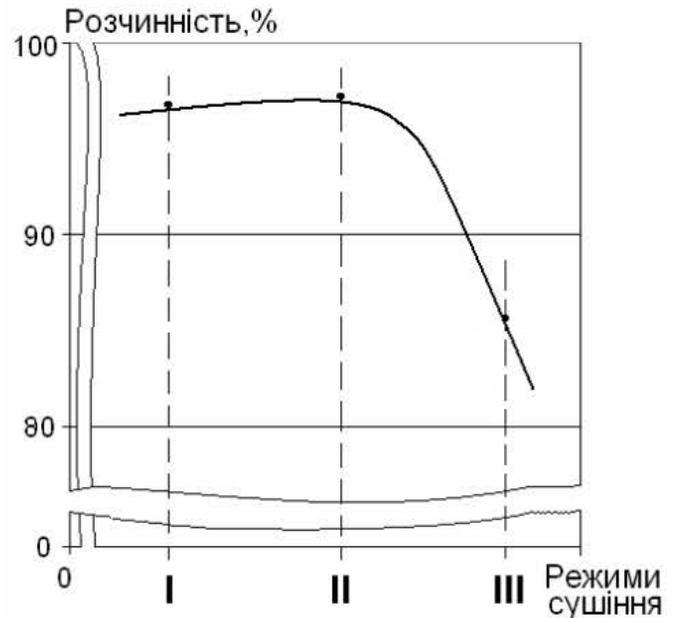


Рис. 3. Розчинність [%] порошків білкового продукту, отриманих за різних температурних режимів розпилювального сушіння.

на вході в сушильну камеру вище 180 °С, що покращує умови його висушування завдяки термостійкості та поліпшеним структуруючим та паропровідним властивостям матеріалу.

Встановлені на експериментальній розпилювальній сушарці раціональні теплотехнологічні параметри процесу отримання сухої форми гідролізованного білкового продукту забезпечують високі якісні характеристики продукту з терміном зберігання до 1 року.

ЛІТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Малецкая К.Д., Шморгул В.В. Кинетика и технология сушки распылением. – К.: Наукова думка. – 1987. – 224 с.
2. Шаркова Н.О. Дослідження кінетики сушіння крапель водних розчинів білкових композицій / Н.О. Шаркова, Е.К. Жукотський, Т.Я. Турчина и др. // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2013. – Вип. 43, Т. 2. – С. 50–52.
3. Турчина Т.Я. Исследование влияния состава белковых композиций на кинетику их сушки в диспергированном состоянии / Т.Я. Турчина, Э.К. Жукотский, А.В. Декуша,

//Сб. материалов 5-й Межд. науч.-практ. симпозиума «Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлаж-

ностная. обработка материалов)». (СЭТТ-2014), г. Иваново (Россия), 2014. – Т.1, Секция 3. – С. 271–274.

**RESEARCH AND OPTIMIZATION OF
HEAT TECHNOLOGICAL PARAMETERS
FORMS OF OBTAINING DRY HYDROLYZED
PROTEIN PRODUCT BY SPRAYING**

Sharkova N.O., Turchina T.Ya., Zhukotsky E.K.

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

The article presents experimental data of researching spray drying process of aqueous solution of hydrolyzed protein product in different temperature coolant ranges. Established rational thermal technological parameters of dry form obtaining of hydrolyzed protein product at spray dryer, which provide improvement of structural and mechanical characteristics of the powder, increase its output from the camera of the spray dryer to 93...95 % and provide high quality product.

References 3, tables 2, figures 3.

Key words: hydrolyzed protein products, spray drying, coolant temperature, output of powder.

1. *Dolynskyy A.A., Maletskaya K.D., Shmorgun V.V.* Kinetics and spray-drying technology. – Kyiv: Naukova Dumka. – 1987. – 224 p.

2. *Sharkova N.O.* The study of the kinetics of drying drops of water solutions of protein compositions / N.O. Sharkova, L.Yu. Avdeeva, E.K. Zhukotsky, T.Ya. Turchyna, G.V. Dekusha, L.A. Kostyanets, A.V. Tkachenko // Proceedings ONAFT. – Odessa, 2013. – Vol. 43, T. 2. – P. 50–52.

3. *Turchyna T.Ya.* Investigation of protein composition influence on drying kinetic in dispersed condition / T.Ya. Turchyna, E.K. Zhukotsky, A.V. Dekusha // Sat. materials of 5th int. scientific and practical symposium «Energy-saving technologies for drying and hydrothermal processing (DHTP-2014)», Ivanovo (Russia), 2014. – Vol. 1, Section 3. – P. 271–274.

Получено 02.06.2015

Received 02.06.2015

УДК 620.9; 621.484/.484

КОТЕЛЬНАЯ С ВНУТРИЦИКЛОВЫМИ КОГЕНЕРАЦИОННО-ТЕПЛОНАСОСНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Билека Б.Д., докт. техн. наук, Гаркуша Л.К.

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

Запропонована схема котельні великої потужності з когенераційно-теплонасосними установками для двотрубної системи теплопостачання. Застосування когенераційно-теплонасосних установок без виробництва товарної електроенергії забезпечує значну економію газу та підвищує надійність теплопостачання.

Предложена схема котельной большой мощности с когенерационно-теплонасосными установками для двухтрубной системы теплоснабжения. Применение когенерационно-теплонасосной технологии без производства товарной электроэнергии обеспечивает значительную экономию газа и повышает надежность тепло-снабжения.

The scheme of the high power boiler-house with cogeneration heat pumping plants for the two-tube system of heat supply is proposed. The application of cogeneration heat pumping technology without production of goods electrical power provides for the considerable economy of gas and increases the reliability of heat supply.

Библ. 6, табл. 2, рис. 1.

Ключевые слова: котельная, двухтрубная система теплоснабжения, когенерационно-теплонасосная технология, газотурбинная установка, котел-утилизатор, тепловой насос.

ГТУ – газотурбинная установка;

ТН1 – тепловой насос отопительного сезона;

ТН2 – тепловой насос неотапливаемого сезона;

ПС – продукты сгорания;

К – теплофикационный котел.

В больших городах централизованное энергоснабжение базируется на ТЭЦ, принцип работы которых основан на комбинированном производстве тепловой и электрической энергии, который гораздо эффективнее их раздельного производства. Основными недостатками ТЭЦ являются высокая капитальная стоимость и длительность периода ввода в эксплуатацию. Для коммунального хозяйства Украины, постоянно испытывающего нехватку средств на модернизацию и развитие теплоэнергетики, эти недостатки ТЭЦ в условиях быстро растущих городов чреваты порождением энергетического дефицита. И если возникающий дефицит в электроэнергии восполняется за счет избыточных электрических мощностей в Украине, доставшихся в наследство от Советского Союза, то для восполнения дефицита в тепловой энергии резервов нет. В украинских городах этот дефицит восполняется путем строительства котельных, в том числе котельных большой проектной мощности. Строительство котельных обходится гораздо дешевле ТЭЦ, и сроки ввода их в эксплуатацию тоже значительно ниже. Таким образом, в интере-

сах сегодняшнего дня Украина возвращается к раздельному производству тепловой и электрической энергий, и газ, сжигаемый в котельных, используется неэффективно, что в перспективе означает его перерасход. Но газ является не только наиболее ценным энергетическим топливом, позволяющим использовать наиболее эффективные энергетические технологии – газотурбинные, парогазовые, обеспечивающие значительную экономию топлива и существенный экологический эффект, но и ценным сырьем для химической промышленности, моторным и бытовым топливом, находит применение в производстве сельскохозяйственной продукции. Широкое использование газа порождает его дефицитность и высокую стоимость. Газ необходимо экономить.

Наиболее эффективной технологией генерации теплоты, обеспечивающей значительную экономию газа в котельных (до 15...60 %), является когенерационно-теплонасосная технология [1-3] при условии полного потребления котельной производимой когенерационной установкой электроэнергии. При этом не ставится цель превращения

котельной в мини-ТЭЦ с производством товарной электроэнергии, что является целью применения когенерационных технологий. В предлагаемой когенерационно-теплососной технологии процесс производства электроэнергии является чисто внутрицикловым процессом при производстве теплоты и служит для питания электроэнергией компрессионных теплососных установок и вспомогательных систем котельной.

Внутрицикловые когенерационно-теплососные технологии наиболее перспективны в котельных большой мощности. Принципиальная схема котельной, использующей когенерационно-теплососную технологию для подготовки теплоносителя при двухтрубной системе теплоснабжения, представлена на рисунке. Схема котельной содержит две технологических линии подготовки теплоносителя – для отопительного и неотопительного сезонов. И хотя параметры теплоносителя на выходе этих линий одинаковы, эти линии имеют существенно различную тепловую мощность, различную схему и режим работы.

Составляющими технологической линии отопительного сезона являются когенерационно-теплососная установка, состоящая из когенерационной установки на базе ГТУ с электрогенераторами и котлом-утилизатором 1, тепловой насос большой мощности (ТН1), теплофикационные котлы (К) и система трубопроводов с вентилями, регулирующими направление движения теплоносителя. Технологическая линия отопительного сезона производит теплоноситель как для системы отопления, так и для системы горячего водоснабжения и работает в двух режимах – дневном и ночном. При дневном режиме работы теплоноситель поступает из обратной магистрали с температурой порядка 50 °С в тепловой насос, который является первой ступенью подогрева теплоносителя, после теплового насоса поступает в котел-утилизатор, который является промежуточной ступенью нагрева с использованием выхлопных газов ГТУ, после которой для догрева до температуры в подающей магистрали (150 °С) поступает в теплофикационные котлы.

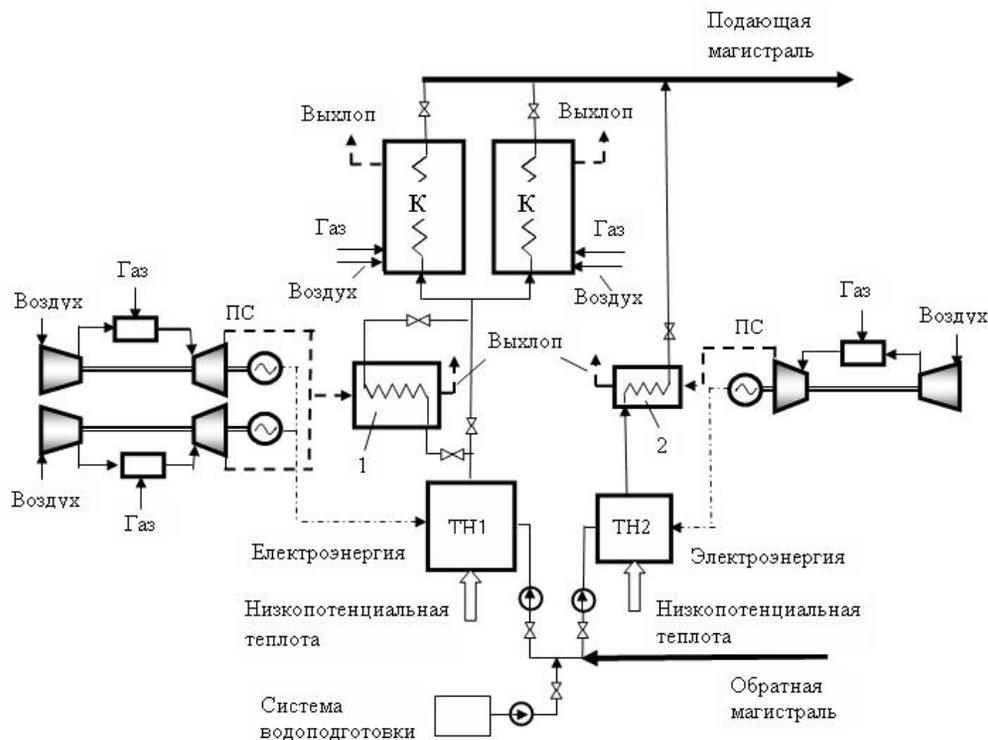


Схема котельной с внутрицикловой когенерационно-теплососной установкой.
К – теплофикационный котел; ПС – продукты сгорания ГТУ; ТН1, ТН2 – тепловые насосы технологических линий отопительного и неотопительного сезонов соответственно;
1, 2 – котлы-утилизаторы когенерационных установок технологических линий отопительного и неотопительного сезонов соответственно.

В ночное время технология подготовки теплоносителя упрощается. Отключается когенерационная установка и теплоноситель после теплового насоса поступает непосредственно в теплофикационные котлы. При этом тепловой насос и все вспомогательное оборудование котельной потребляют электроэнергию из сети по ночному тарифу.

Технологическая линия неотапительного сезона представлена когенерационно-теплонасосной установкой меньшей мощности, состоящей из когенерационной установки на базе ГТУ с электрогенераторами и котлом-утилизатором 2 и теплового насоса (ТН2). Технологическая линия готовит теплоноситель для системы горячего водоснабжения и работает круглосуточно в стационарном режиме, обеспечивающим наибольшую эффективность использования когенерационно-теплонасосных установок. Для обеспечения стационарной работы когенерационных установок в системе горячего водоснабжения должны быть предусмотрены тепловые аккумуляторы, используемые в европейских странах при применении тепловых насосов.

Ключевыми элементами в обеих технологических схемах, обеспечивающими экономию топлива, являются компрессионные теплонасосные установки, питающиеся электроэнергией, производимой когенерационными установками, и являющиеся первой ступенью подогрева теплоносителя, поступающего в котельную из обратной магистрали. Котел-утилизатор когенерационной установки в отопительной линии является промежуточной ступенью подогрева теплоносителя, а теплофикационные котлы – конечной ступенью. В технологической линии подготовки теплоносителя для системы горячего теплоснабжения котел-утилизатор когенерационной установки является конечной ступенью подогрева теплоносителя. При этом тепловой мощности котлов-утилизаторов практически достаточно для догрева теплоносителя до проектной температуры в подающей магистрали.

Когенерационная установка в линии отопительного сезона в ночное время отключается, а тепловой насос и вспомогательное оборудование котельной используют сетевую электроэнергию по ночному тарифу. Теплоноситель после теплового насоса для догрева до температуры в по-

дающей магистрали поступает непосредственно в теплофикационные котлы, тепловая мощность которых в ночные часы увеличивается.

В качестве примера была рассмотрена схема котельной с внутрицикловой когенерационно-теплонасосной установкой мощностью 300 МВт при мощности горячего водоснабжения 60 МВт для двухтрубной системы теплоснабжения. Показатели котельной представлены в таблице 1.

При расчете использовались данные по газотурбинным установкам ГП НПКГ «Зоря – Машпроект» [4]. В качестве низкопотенциального источника для теплонасосной установки рассматривались канализационные стоки [5]. При оценке затрат электроэнергии на собственные нужды котельной учитывались расход электроэнергии на работу котлов (3,9 % от мощности котлов) [6], на работу тепловых насосов и прокачку теплоносителей – целевого и низкопотенциального для теплового насоса.

Ниже приведены результаты сравнительного анализа показателей рассмотренной и типовой теплофикационной котельной (таблица 2). Расход газа обычной котельной такой же мощности с современными котлами с КПД 92 % при номинальной нагрузке в отопительный период составляет 23450 кг/час, в неотапительный период на горячее водоснабжение – 4691 кг/час. Среднегодовой расход газа – 14071 кг/час. Таким образом, применение рассмотренной когенерационно-теплонасосной технологии приводит к значительной экономии газа котельной. Источники экономии газа – использование даровых низкопотенциальных источников теплоты и теплоты сбросных газов ГТУ. Наименьший расход газа достигается в ночное время отопительного сезона (40,4 %), когда котельная потребляет электроэнергию из сети по ночному тарифу. Среднегодовая экономия газа котельной при этом составляет – 23,9 %. В том случае, если котельная не потребляет электроэнергии из сети, экономия газа котельной в отопительный сезон составляет 14,8 %, а годовая экономия – 16,8 %.

Дополнительное оборудование, устанавливаемое в котельной при использовании когенерационно-теплонасосной технологии (газовые турбины, котлы-утилизаторы, тепловые насосы) при стоимости ГТУ 550 \$/кВт, котла-утили-

затра 23,3 \$/МВт, теплового насоса 150 \$/кВт (при оценке окупаемости с учетом только стоимости дополнительного оборудования).
 при годовой экономии газа 23,9 % и стоимости газа 350 \$/1000 м³ окупается за 4,6 лет

Таблица 1

Технологические параметры	Отопительный сезон		Неотопительный сезон
	Дневное время	Ночное время	
Котельная			
Мощность котельной, МВт	300	300	60
Расход теплоносителя, кг/с	716	716	143,2
Температура в подающей магистрали, °С	150	150	151,6
Давление в подающей магистрали, МПа	2,5	2,5	2,5
Температура в возвратной магистрали, °С	50	50	50
Давление в обратной магистрали, МПа	0,5	0,5	0,5
Мощность теплофикационных котлов, МВт	102,7	179,5	
КПД теплофикационных котлов	92 %	92 %	
Расход топлива котлами, кг/с	2,23	3,90	
Расход топлива котельной, кг/с	5,56	3,90	1,14
Среднесуточный расход газа котельной, кг/с	5,01		1,14
Среднегодовой расход газа котельной, кг/с	3,07		
Тепловой насос			
Рабочее тело	R142	R142	R142
Мощность теплового насоса, МВт	127,7	126,5	39,8
Потребляемая электрическая мощность, МВт	42,6	39,6	14,7
Коэффициент трансформации	3,00	3,04	2,71
Расход теплоносителя, кг/с	716	716	143,2
Температура в испарителе, °С	5	5	5
Температура в конденсаторе, °С	95,7	93,5	117,7
Температура теплоносителя на входе, °С	50	50	50
Температура теплоносителя на выходе, °С	92,6	93,5	116,3
Когенерационная установка			
Газотурбинная установка	UGT 25000		UGT 6000
Электрическая мощность ГТУ, МВт	25		6
Тепловая мощность ГТУ	34,8		9,2
Расход топлива ГТУ, кг/с	1,667		0,476
Число газотурбинных установок	2		1
Производство электроэнергии, МВт	50		6
Расход газа когенерационной установкой, кг/с	3,334		1,139
Тепловая мощность котла-утилизатора, МВт	69,6		9,2

Экономия газа связана не только со значительным экономическим эффектом, обуславливающим снижение себестоимости товарной тепловой энергии, но и означает существенное снижение степени загрязнения окружающей среды. Кроме этих преимуществ рассмотренной технологии, необходимо отметить, что котельная при этом

практически независима от электрической сети, что обеспечивает высокую надежность теплоснабжения. Это важное преимущество для котельной большой мощности. Известны случаи, когда обесточивание крупной котельной в отопительный период приводило к серьезным последствиям.

Таблица 2

Отопительный сезон	кг/час	Экономия газа, %
Расход газа в дневное время	20030	14,6
Расход газа в ночное время	14029	40,2
Среднесуточный расход газа	18029	23,1
Неотопительный сезон	4100	12,6
Расход газа	3427	26,9
Среднегодовой расход газа	10706	23,9

Выводы

1. Использование в котельных большой мощности, работающих на газе, внутрицикловых когенерационно-теплонасосных установок обеспечивает значительную сезонную и среднегодовую экономию топлива, повышает надежность теплоснабжения, улучшает экологические показатели котельной при приемлемых сроках окупаемости когенерационно-теплонасосного оборудования и позволяет в значительной мере компенсировать перерасход топлива, обусловленный переходом на раздельное производство энергий.

2. Энергосберегающие и экологические показатели котельной с внутрицикловыми когенерационно-теплонасосными установками значительно улучшаются при использовании ночного тарифа в отопительный сезон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.Д.Билека, Р.В.Сергиенко, В.Я.Кабков. Экономичность когенерационных и комбиниро-

ванных когенерационно-теплонасосных установок с газопоршневыми и газотурбинными двигателями. //Авиационно-космическая техника и технология, 7 (74), 2010. С.1–3.

2. Патент України на корисну модель № 78343 //Система гарячого водопостачання з котельнею великої потужності. // Б.Д.Билека, Л.К.Гаркуша, С.В.Бабак, 11.03.2013, Бюл. № 5.

3. Снежкін Ю.Ф., Уланов М.М., Чалаєв Д.М.. Теплонасосні технології – ефективний шлях енергозбереження // Промышленная теплотехника, № 7, 2013 г.

4. Каталог энергетического оборудования. «Турбины и Дизели»-2007.//ОАО «Турбомашинь», Россия, Рыбинск Ярославской обл., .- 351 с.

5. Зимин Л.Б., Фиалко Н.М..Анализ эффективности теплонасосных систем утилизации теплоты канализационных стоков для теплоснабжения социальных объектов //Промышленная теплотехника, № 1, 2008 г.

6. Теплотехнический справочник. Том 1// М.: Энергия, 1975. – 743 с.

THE BOILER-HOUSE WITH INTERSYCLE COGENERATION HEAT PUMPING PLANTS

Bileka B.D., Garkusha L.K.

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

In the Ukraine, under condition of the rapidly growing cities the emerging thermal energy shortage is replenished by the construction of boiler-houses including high power gas-fired boilers, In this connection there is an urgent problem of increasing efficiency of using gas under conditions of boiler-house and its economy. The scheme of the high power boiler-house with cogeneration heat pumping plants for the two-tube system of heat supply is proposed. The application of cogeneration heat pumping technology without production of goods electrical power provides for the considerable economy of gas and increases the reliability of heat supply.

References 6, tabl. 2, fig. 1.

Key words: boiler-house, two-tube system of heat

supply, cogeneration heat pumping technology, gas turbine power plant, waste-heat boiler, heat pump.

1. B.D.Bileka, R.V.Sergienko, V.Ja.Kabkov. Jekonomichnost' kogeneracionnyh i kombinirovannyh kogeneracionno-teplonasosnyh ustanovok s gazoporshnevymi i gazoturbinnymi dvigateljami. // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, 7 (74), 2010. s.1-3.

2. Patent Ukraïni na korisnu model' № 78343 // Sistema garjachogo vodopostachannja z kotel'neju velikoï potuzhnosti. // B.D.Bileka, L.K.Garkusha, S.V Babak, 11.03.2013, Bjul. № 5.

3. Sneezhkin Ju.F., Ulanov M.M., Chalaev D.M.. Teplonasosni tehnologii – effektivnij shljah energoberezhennja // Promyshlennaja teplotehnika, № 7, 2013 g.

4. Katalog jenergeticheskogo oborudovanija. «Turbiny i Dizeli»-2007.//OAO «Turbomashiny», Rossija, Rybinsk Jaroslvskoj obl., .- 351 s.

5. Zimin L.B., Fialko N.M.. Analiz jeffektivnosti teplonasosnyh sistem utilizacii teploty kanalizacionnyh stokov dlja teplosnabzhenija social'nyh ob"ektov // Promyshlennaja teplotehnika, № 1, 2008 g.

6. Teplotehnicheskij spravocnik. Tom 1// M.: Jenergija, 1975. – 743 s.

Получено 16.06.2015

Received 16.06.2015

УДК 621.039.5; 621.438

АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА БЛОКА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ЯЭУ С ГЕЛИЕВЫМ РЕАКТОРОМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ВОДОРОДА

^{1,2}Халатов А.А., академик НАН Украины, ¹Северин С.Д., канд. техн. наук, ^{1,2}Доник Т.В., канд. техн. наук

¹ Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2-А, Киев, 03680, Украина

² Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

Наведено аналіз термодинамічного циклу блоку перетворення енергії модульної ядерної енергетичної установки четвертого покоління з високотемпературним гелієвим реактором тепловою потужністю 250 МВт для спільного виробництва електроенергії і водню. Дається аналіз впливу параметрів парогенератора на показники ефективності циклу.

Приведен анализ термодинамического цикла блока преобразования энергии модульной ядерной энергетической установки четвертого поколения с высокотемпературным гелиевым реактором тепловой мощностью 250 МВт для совместного производства электроэнергии и водорода. Дается анализ влияния параметров парогенератора на показатели эффективности цикла.

The analysis is presented considering thermodynamic cycle of the energy conversion unit of the fourth-generation modular nuclear power plant with a high-temperature helium reactor of 250 MWt thermal power designated for the combined production of electricity and hydrogen. The analysis is given providing influence of steam generator parameters on the thermodynamic cycle efficiency.

Библ. 5, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: модульная ядерная энергетическая установка, высокотемпературный гелиевый реактор, газотурбинная установка, сложный термодинамический цикл Брайтона, термодинамическая эффективность цикла, производство водорода.

G – расход гелия;
 L – работа турбины;
 N – мощность цикла;
 P – давление потока;
 T – температура потока;
 Q – тепловая мощность;
 η – коэффициент полезного действия.

Индексы:

пг – парогенератор;
 пр – полезная работа;
 р – реактор;
 т – турбина;

эл – электрический.

Сокращения:

АЭС – атомная электростанция;
 БПЭ–ГТУ – блок преобразования энергии – газотурбинная установка;
 ВТГР – высокотемпературный гелиевый реактор;
 ГТ–МГР – газовая турбина – модульный гелиевый реактор;
 ГТМГР–ВЭП – газовая турбина – модульный гелиевый реактор – высокотемпературный электролиз пара;
 ГТУ – газотурбинная установка.

Введение

В настоящее время АЭС играют ведущую роль в энергетике Украины, ежегодно они производят более 45 % электроэнергии от общего количества в стране. В ближайшие 10...12 лет срок эксплуатации большинства АЭС Украины

истекает и на смену им должны прийти атомные электростанции следующего поколения. Одним из перспективных направлений для Украины представляется использование модульных атомных энергоблоков тепловой мощностью реакторов 200...300 МВт, которые могут быть использова-

ны как для самостоятельной работы, так и в составе более крупных блоков. Это способствует не только сокращению финансовых рисков, но и повышению безопасности функционирования ядерных реакторов.

Главным направлением развития ядерной энергетики является создание экологически чистых реакторов 4-го поколения повышенной безопасности. В ряде стран в рамках программы «Ядерные реакторы IV поколения» ведутся активные работы по международному проекту «Generation IV». Одной из возможных концепций создания модульных ядерных электростанций четвертого поколения является концепция ВТГР, в котором в качестве теплоносителя для охлаждения реактора и рабочего тела для блока преобразования энергии, представляющего собой газотурбинную установку сложного цикла (БПЭ–ГТУ), используется гелий [1, 2]. При практической реализации программы развития ядерной энергетики одним из перспективных направлений является получение водорода из воды с помощью энергии, производимой на модульных АЭС. Известно, что водород является хорошим энергоносителем для использования в двигателях, автономных генераторах электричества и теплоты, его удобно применять в теплоснабжении, транспортировать и аккумулировать. Для получения водорода используются замкнутые термохимические и термоэлектрохимические циклы, высокотемпературный электролиз, а также другие способы. Сегодня стоимость производства 1 кг водорода при конверсии метана составляет 2...5 долл. США, при газификации угля – 2...2,5 долл. США, при электролизе воды за счет энергии ветра – 7...11 долл. США и энергии Солнца – 10...30 долл. США. При использовании атомной энергетики уже сегодня эта цифра составляет 2...2,3 долл. США за 1 кг водорода и может быть существенно снижена. Таким образом, производство водорода из воды с помощью энергии ядерных реакторов может в самое ближайшее время стать кардинальным решением мировой энергетической проблемы.

Производство водорода с использованием термохимических, термоэлектрохимических циклов и методом высокотемпературного электролиза пара требует пара высоких параметров, и чем

более высокую температуру теплоносителя может обеспечить реакторная установка, тем выше суммарный КПД производства водорода [3]. В настоящее время в ряде стран разрабатываются проекты по объединению ВТГР с высокотемпературными электролизёрами, что позволит достичь значений суммарного КПД производства водорода до 50 %. Совместное производство электроэнергии и водорода на АЭС позволяет решить также и другую важную для Украины проблему – проблему существенно переменного суточного графика нагрузок (ночного «провала»), который характеризуется снижением потребления электрической нагрузки в ночное время. Разница между максимально и минимально потребной мощностью составляет около 7 ГВт, а пиковые нагрузки покрываются за счет работы тепловых электростанций в маневренном режиме. В настоящее время маневренных мощностей в Украине не хватает, а строительство гидро- и гидроаккумулирующих станций требует больших финансовых затрат и отчуждения плодородных земель. В соответствии с мировой практикой для стабильной работы энергосистемы маневренные мощности в стране должны составлять не менее 15 % от установленной мощности, в то время как в Украине эта цифра находится на уровне 10 %. При выработке водорода во время ночного снижения нагрузки излишек электроэнергии используется для производства и накопления водорода, а в период пиковых и полупиковых нагрузок запасенный водород может использоваться для выработки электрической и тепловой энергии.

Цель настоящей работы – исследование термодинамического цикла БПЭ–ГТУ с высокотемпературным гелиевым реактором для совместного производства электрической энергии и водорода. В статье выполнен расчет параметров термодинамического цикла, мощности и эффективности ГТУ сложного цикла, исследовано влияние термодинамических параметров парогенератора на эффективность цикла.

Схема ГТМГР–ВЭП и термодинамический цикл БПЭ–ГТУ

Схема реакторной установки ГТМГР–ВЭП для совместного производства электроэнергии и перегретого водяного пара требуемых пара-

метров с целью получения водорода методом высокотемпературного электролиза пара показана на рис. 1.

Энергетическая установка ГТМГР–ВЭП имеет контуры производства электроэнергии и теплоты, а также перегретого пара высокой температуры. Контур производства электроэнергии и теплоты представляет собой гелиевый ядерный реактор и блок преобразования энергии, подробно рассмотренный в [4]. Как и в ядерной установке для производства электроэнергии [4], блок преобразования энергии состоит из компрессоров низкого и высокого давления, вертикальной гелиевой турбины, находящейся на од-

ном валу с компрессорами, предварительного и промежуточного теплообменников, регенератора и электрогенератора. Источником тепла в цикле для производства электроэнергии и перегретого пара является модульный гелиевый реактор. Температура гелия на выходе из реактора составляет 850 °С, что не превышает соответствующей температуры в прототипе энергетической установки ГТ–МГР. Использование в качестве рабочего тела гелия, обладающего высокой изобарной теплоёмкостью и высоким значением газовой постоянной, обеспечивает относительно небольшие для атомных электростанций габариты газовой турбины.

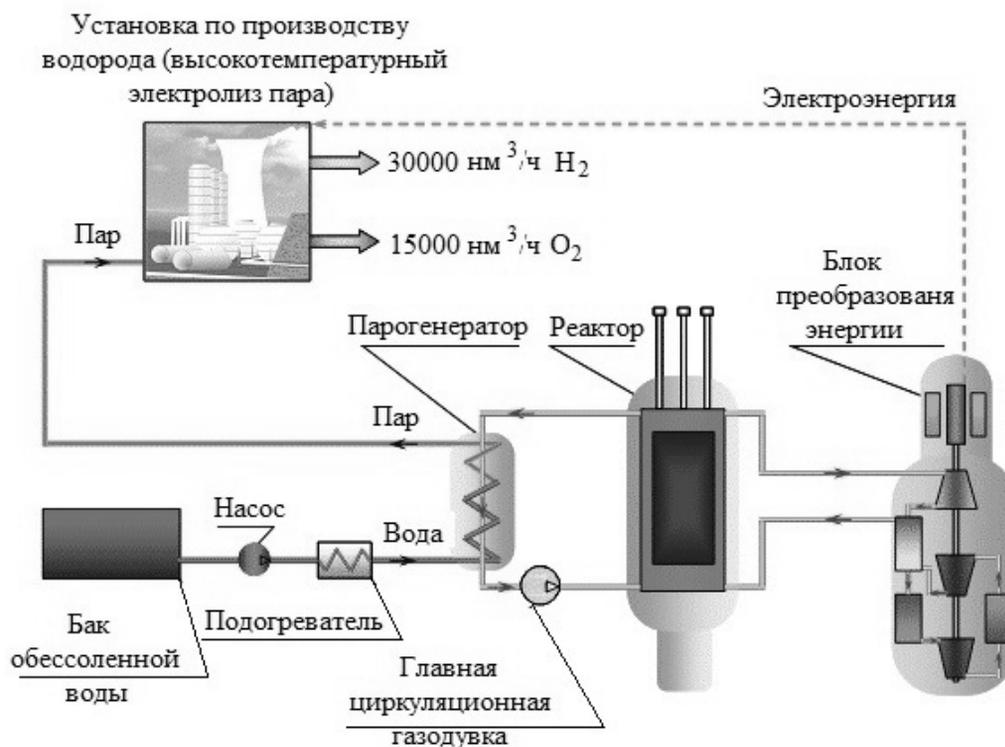


Рис. 1. Принципиальная схема ГТМГР–ВЭП.

Главным отличием схемы реакторной установки ГТМГР–ВЭП от установки ГТ–МГР является наличие отдельного гелиевого контура с включённым парогенератором. Циркуляция нагретого гелия через парогенератор осуществляется при помощи главной циркуляционной газодувки. Подвод обессоленной воды в парогенератор и отвод пара производится через крышку парогенератора. Перегретый до требуемых

параметров пар отводится по трубопроводам в установку высокотемпературного электролиза на твердооксидных электрохимических элементах, в которой водяной пар разлагается на водород и кислород с последующим разделением этих реагентов. Электроэнергия необходимая для работы установки высокотемпературного электролиза пара (ВЭП) поступает от электрогенератора БПЭ.

Главными достоинствами рассматриваемой

схемы является исключение дополнительных гидравлических потерь в цикле БПЭ на прокачку гелия через парогенератор, которые неизбежно приводят к снижению электрического КПД цикла, а также относительно невысокая температура рабочего тела (гелия) в реакторной зоне, что предъявляет менее жесткие требования к конструкционным материалам, из которых изготовлен реактор.

Основными характеристиками термодинамического цикла с учетом контура производства перегретого пара является его эффективность, которая оценивается электрическим КПД ГТУ (коэффициентом использования теплоты), представляющим собой отношение электрической мощности цикла к теплоте, подведенной к рабочему телу в реакторе [5]:

$$\eta_{эл} = \frac{N_{эл}}{Q_p}, \quad (1)$$

и коэффициентом полезной работы цикла

$$\eta_{вн} = \frac{l_{ц}}{q_p}, \quad (2)$$

где Q_p – тепловая мощность реактора, Вт; $N_{эл} = G_r \cdot l_{ц} \cdot \eta_r$ – электрическая мощность, МВт,

где $G_r = \frac{Q_p - Q_{пг}}{q_p}$ – потребный расход гелия в цик-

ле БПЭ; $q_p = h_6 - h_5 = C_p (T_6 - T_5)$ – удельная теплота, полученная рабочим телом в реакторе.

Результаты исследований и их анализ

Математическая модель и алгоритм расчета сложного цикла ГТУ, включающая последовательный расчет параметров цикла для режима выработки электроэнергии и производства перегретого пара в парогенераторе аналогичны рассмотренным в работе [4]. Основные исследования проводились для ГТУ модульного гелиевого реактора тепловой мощностью 250 МВт. Начальные данные для расчета цикла ГТУ были выбраны на основании анализа имеющихся в литературе данных по КПД турбомашин, эффективности теплообменников и парогенератора, соответствующие достигнутому технологическому уровню в современном газотурбостроении (табл. 1). Для сравнения в таблице представлены исходные данные, которые были использованы ранее при

расчёте цикла БПЭ для производства электроэнергии [4].

В расчетах использовались следующие значения теплофизических свойств гелия: удельная теплоемкость при постоянном давлении – $c_p = 5195$ Дж/кг·К; удельная теплоемкость при постоянном объеме – $c_v = 3117$ Дж/кг·К; показатель адиабаты – $k = 1,6667$. Результаты расчетов циклов для двух рассмотренных режимов работы ГТУ представлены в таблице 2.

Результаты расчетов циклов для двух рассмотренных режимов работы ГТУ представлены в таблице 2.

Предварительный расчёт парогенератора выполнен с использованием метода тепловых балансов с учётом реальных теплофизических свойств воды и водяного пара. В результате выполненных расчётов были получены потребный расход гелия через парогенератор (13,6 кг/с), паропроизводительность парогенератора (10,5 кг/с) и значение его тепловой мощности (25 МВт) при отсутствии потерь теплоты в окружающую среду, (КПД парогенератора 1,0 %). Более точные расчёты парогенератора могут привести к некоторому росту его потребной мощности, поэтому в качестве рабочего диапазона потребной мощности парогенератора ГТМГР–ВЭП с тепловой мощностью реактора 250 МВт будет рассматриваться диапазон 25...35 МВт.

Как следует из расчётов цикла, при тепловой мощности реактора 250 МВт, в режиме выработки электроэнергии полезная электрическая мощность установки составляет 115,73 МВт, а электрический КПД – 46,3 %. Потребные мощности теплообменного оборудования БПЭ–ГТУ составляют: регенератор – 123,7 МВт; предварительный теплообменник – 132,74 МВт; промежуточный теплообменник – 111,18 МВт. В режиме совместного производства электроэнергии и перегретого пара при тепловой мощности парогенератора 25 МВт и температуры гелия на выходе из парогенератора 395 °С полезная электрическая мощность цикла составляет 104,16 МВт с электрическим КПД равным 41,7 %. При этом потребные мощности регенератора, предварительного и промежуточного теплообменников равны 111,33 МВт, 119,47 МВт и 100,06 МВт, соответственно.

Табл. 1. Исходные данные для расчета цикла ГТУ

№ п.п.	Параметр	Режим выработки электроэнергии	Выработка электроэнергии и производство перегретого пара
1	Тепловая мощность реактора, МВт	250	250
2	Тепловая мощность парогенератора, МВт	-	25
3	Температура гелия на входе в реактор, °С	560	500
4	Температура гелия на выходе из реактора, °С	850	850
5	Температура гелия на выходе из парогенератора, °С	-	395
6	Давление гелия на входе в реактор, МПа	5,0	5,0
7	Температура гелия на выходе из турбины, °С	585	595
8	КПД турбины	0,93	0,93
9	КПД компрессора низкого давления	0,875	0,875
10	КПД компрессора высокого давления	0,85	0,85
11	Коэффициент эффективности регенератора	0,85	0,8
12	Коэффициент эффективности предварительного теплообменника	0,85	0,85
13	Коэффициент эффективности промежуточного теплообменника	0,85	0,85
14	Относительные потери давления в горячей магистрали регенератора, %	3,0	3,0
15	Относительные потери давления в холодной магистрали регенератора, %	3,0	3,0
16	Относительные потери давления в горячей магистрали предварительного теплообменника, %	3,0	3,0
17	Относительные потери давления в горячей магистрали промежуточного теплообменника, %	3,0	3,0

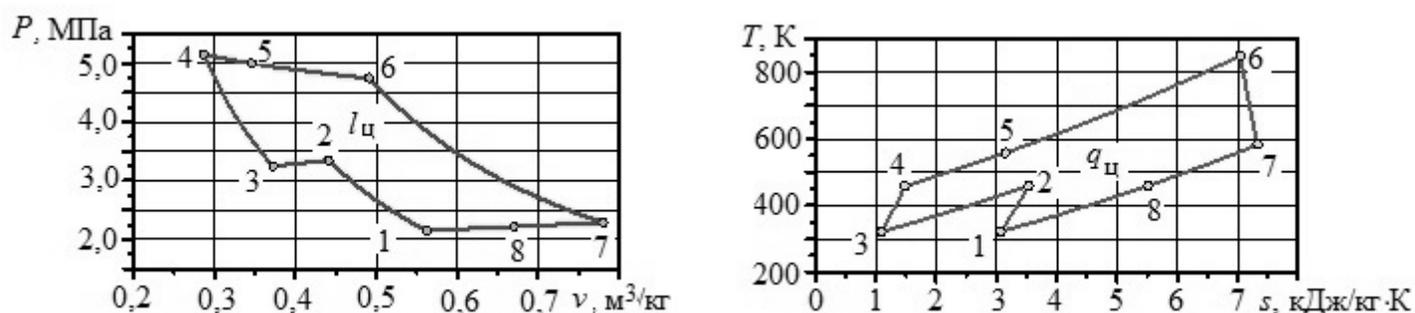


Рис. 2. P - v и T - s диаграммы цикла ГТУ с тепловой мощностью реактора 250 МВт при выработке электроэнергии и производстве перегретого пара.

Табл. 1. Результаты расчета цикла ГТУ

№ п.п.	Параметр	Режим выработки электроэнергии	Выработка электроэнергии и производство перегретого пара
1	Потребный расход гелия через БПЭ, кг/с	165,94	149,35
2	Потребный расход гелия через парогенератор, кг/с	-	13,556
3	Суммарная степень повышения давления в компрессоре	2,397	2,397
4	Степень повышения давления в компрессоре низкого давления	1,557	1,557
5	Степень повышения давления в компрессоре высокого давления	1,539	1,539
6	Степень понижения давления в турбине	2,078	2,078
7	Работа турбины, КДж	1376,7	1376,7
8	Удельная работа цикла, КДж/кг	706,62	706,62
9	Потребная мощность регенератора, МВт	123,7	111,33
10	Потребная мощность предварительного теплообменника, МВт	132,74	119,47
11	Потребная мощность промежуточного теплообменника, МВт	111,18	100,06
12	Полезная электрическая мощность ГТУ, МВт	115,73	104,16
13	Тепловая мощность парогенератора, МВт	-	25,0
14	Паропроизводительность парогенератора, кг/с	-	11,59
15	Внутренний КПД цикла, %	46,9	42,2
16	Электрический КПД цикла, %	46,3	41,7
17	Коэффициент полезной работы цикла	50,7	50,7

На рис. 2 представлены P-v и T-s диаграммы цикла ГТУ блока преобразования энергии ГТМГР–ВЭП. Видно, что циклы ГТУ блока преобразования энергии ГТМГР–ВЭП, построенные в удельных параметрах, при одинаковой тепловой мощности реактора 250 МВт не отличаются от циклов, рассчитанных для БПЭ ГТ–МГР при производстве электроэнергии [4]. А различие заключается в том, что часть теплоты, полученной рабочим телом в реакторе, расходуется на производство высокотемпературного пара. В связи с этим площади циклов в абсолютных величинах, соответствующие работе и теплоте циклов, в рассматриваемом случае будут меньше, чем площади соответствующих циклов БПЭ ГТ–МГР для производства электроэнергии.

На рис. 3 представлена зависимость элек-

трической мощности БПЭ от тепловой мощности парогенератора. Видно, что при расчетной (базовой) тепловой мощности парогенератора ($Q_{\text{ПГ}} = 25$ МВт) полезная электрическая мощность БПЭ будет равна 104,16 МВт. При возможном увеличении мощности парогенератора до 35 МВт происходит снижение электрической мощности на 5,2 % до 99 МВт. В то же время снижение мощности парогенератора с 25 до 15 МВт приводит к увеличению полезной электрической мощности ГТУ на 4,1 %.

На рис. 4 представлена зависимость электрического и внутреннего КПД БПЭ от тепловой мощности парогенератора. Видно, что для базового режима тепловой мощности парогенератора (25 МВт) с паропроизводительностью парогенератора 10,5 кг/с при температуре пара 800 °С

обеспечивается достаточно высокий электрический КПД цикла (41,7 %). Как следует, увеличение мощности парогенератора до 35 МВт приводит к снижению электрического КПД цикла до 39,8 %, а снижение мощности парогенератора с 25 МВт до 15 МВт – к его росту до 43,5 %.

Таким образом, в рабочем диапазоне изменения тепловой мощности парогенератора ГТМГР–ВЭП от 15 до 35 МВт при его паропроизводительности 10,5 кг/с электрический КПД установки будет изменяться в диапазоне 43,5...39,8 %, а электрическая мощность от 99 до 108,75 МВт.

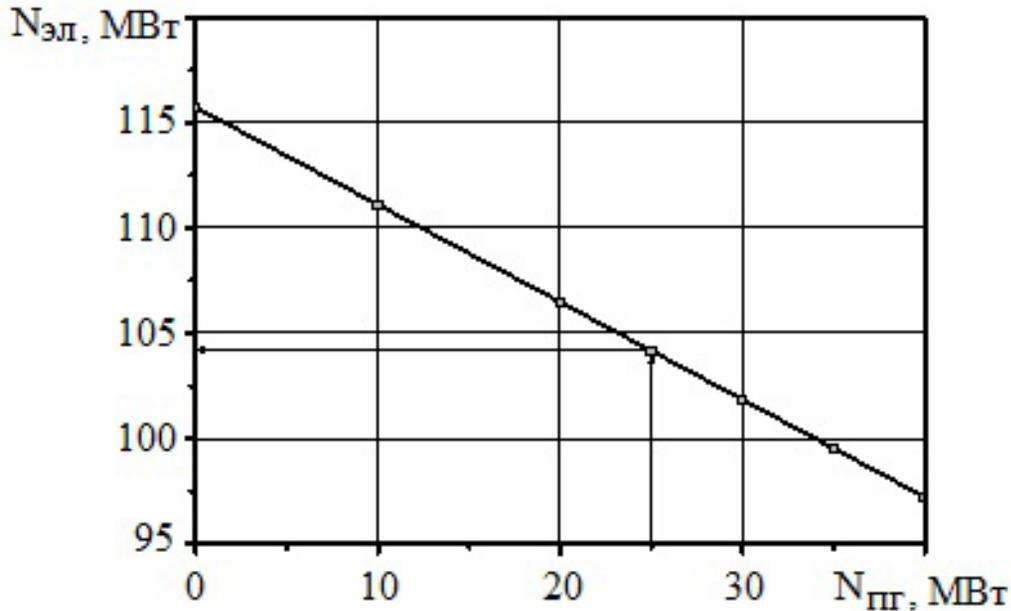


Рис. 3. Зависимость электрической мощности БПЭ от тепловой мощности парогенератора.

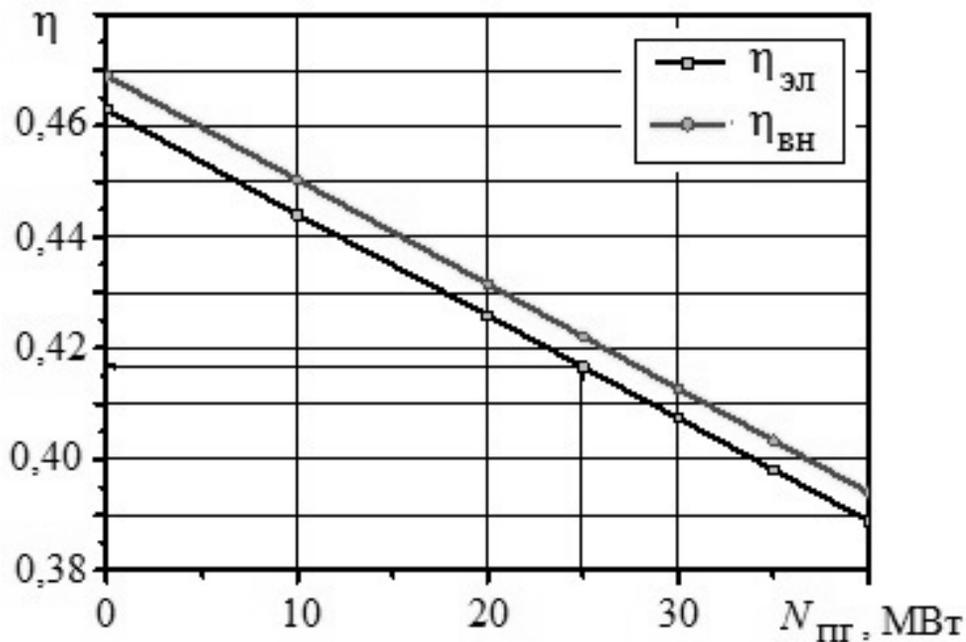


Рис. 4. Зависимость электрического и внутреннего КПД БПЭ от тепловой мощности парогенератора.

Выводы

1. Рассмотрена принципиальная схема ядерной энергетической установки ГТМГР–ВЭП для совместного производства электроэнергии и водорода.

2. Разработан алгоритм и составлена программа расчета сложного термодинамического цикла ГТМГР–ВЭП с тепловой мощностью реактора 250 МВт для производства электроэнергии и водорода методом высокотемпературного электролиза пара.

3. Выполнены расчеты параметров цикла, мощности и эффективности ГТУ сложного цикла при совместном производстве электроэнергии и водорода. Показано, что в базовом режиме при тепловой мощности парогенератора 25 МВт и температуре пара 800 °С полезная электрическая мощность установки составляет 104,16 МВт, а электрический КПД – 41,7 %. Потребные мощности регенератора, предварительного и промежуточного теплообменников равны 111,33 МВт, 119,47 МВт и 100,06 МВт соответственно.

4. Увеличение мощности парогенератора с 25 МВт до 35 МВт приводит к снижению электрической мощности установки на 5,2 %, при этом ее электрический КПД уменьшается до 39,7 %. При снижении мощности парогенератора до 15 МВт электрическая мощность установки увеличивается на 4,1 %, а электрический КПД возрастает до 43,5 %.

5. Результаты расчёта параметров цикла ГТМГР–ВЭП охватывают возможный диапазон их изменения для тепловой мощности реактора

250 МВт с КПД парогенератора равным 1,0. Для получения более точных результатов потребуются использование более полной математической модели парогенератора, учитывающей особенности процессов теплообмена в зависимости от фазового состояния воды для конкретно выбранной конструктивной схемы парогенератора. Как показывают статистические данные, КПД современных парогенераторов составляет около 90 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Zgliczynski, J. B., Silady, F. A., Neylan, A. J.* The Gas Turbine-Modular Helium Reactor (GT-MHR) High Efficiency, Cost Competitive, Nuclear Energy for the Next Century – GA-A21610. General Atomics. – 1994.

2. *LaBar M. P., Shenoy A. S., Simon W. A., Campbell E. M.* «Status of the GT-MHR for Electricity Production» World Nuclear Association Annual Symposium 3-5 September 2003 – London, 15 p.

3. *Schultz K.R.* Use of Modular Helium Reactor for Hydrogen Production / General Atomics Project 04962. – GA-A24428. – 2003.

4. *Халатов А.А., Северин С.Д., Доник Т.В.* Анализ термодинамического цикла ГТУ ядерной модульной энергетической установки с гелиевым реактором // Промышленная теплотехника, – 2015. – Т.37. – №2. – С. 59-66.

5. *Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г., Богов И.А. и др.* Стационарные газотурбинные установки // Под ред. Л.В. Арсеньева, В.Г. Тырышкина – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1989. – 543 с.

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE ENERGY CONVERSION UNIT OF NUCLEAR ENERGY PLANT WITH HELIUM REACTOR FOR THE ELECTRICITY AND HYDROGEN PRODUCTION

Khalatov A.A.^{1,2}, Severin S.D.¹, Donyk T.V.^{1,2}

¹ Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine,

² National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», #37 Prospect Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine

The paper provides an analysis of the thermodynamic cycle of the energy conversion unit of the fourth generation modular nuclear power plant, based on the high-temperature helium reactor of 250 MWt thermal power for combined electricity and hydrogen production. This GTMHR–HTSE power plant has contours of the electricity, heat, and superheated water steam production. The circuit of the electricity and heat production includes the nuclear helium reactor and power conversion unit. The energy conversion unit consists of the low and high pressure compressors and upright helium turbine, connected with compressor shaft, preliminary and intermediate heat exchangers, thermal and electrical generators. The energy source in the cycle of the electricity and superheated water steam production is a modular helium reactor.

Specific feature of the GTMGR–VEP power plant is the individual helium loop including the water steam generator. The superheated water steam of the required thermodynamic parameters is directed to the high-temperature electrolysis unit using solid oxide electrochemical cells, in which the water is decomposed into the hydrogen and oxygen, followed by separation of the reactants. The electricity required for the high-temperature water steam electrolysis operation is supplied from the electrical generator of energy conversion unit.

The cycle analysis in the mode of electricity and superheated water steam production has shown that at the steam generator of 25 MWt thermal power and steam temperature of 800 °C the power plant electrical power is 104.16 MWt, while the electrical efficiency is 41.7 %. The power demand of the

thermal regenerator, preliminary and intermediate heat exchangers is 111.33 MWt, 119.47 MWt and 100.06 MWt, respectively. The results of the GTMGR–VEP power plant cycle calculations cover the possible range of their variations for the basic power of the helium nuclear reactor with the water steam generator efficiency of 1.0.

The analysis was performed providing influence of the water steam generator parameters on the cycle efficiency results. Increase in the water steam generator thermal power from 25 MWt to 35 MWt leads to the reduction of electric power by 5.2 %, while the electrical efficiency decreases to 39.7 %. If the water steam generator thermal power drops down to 15 MWt, then the electrical power plant is elevated by 4.1 %, while the electrical efficiency grows up to 43.5 %.

Key words: gas cooled nuclear power plant, high temperature helium reactor, gas turbine plant of the complex thermodynamic Brayton cycle, cycle thermodynamic efficiency, hydrogen production.

1. *Zgliczynski, J. B., Silady, F. A., Neylan, A. J.* The Gas Turbine-Modular Helium Reactor (GT-MHR) High Efficiency, Cost Competitive, Nuclear Energy for the Next Century – GA-A21610. General Atomics. – 1994.

2. *M. P. LaBar, A. S. Shenoy, W. A. Simon and E. M. Campbell.* «Status of the GT-MHR for Electricity Production» World Nuclear Association Annual Symposium 3-5 September 2003 – London, 15 p.

3. *Schultz K.R.* Use of Modular Helium Reactor for Hydrogen Production / General Atomics Project 04962. – GA-A24428. – 2003.

4. *Khalatov A.A., Severin S.D., Donyk T.V.* Analysis of thermodynamic cycle of gas turbine plant of nuclear modular installation with helium reactor // *Promyishlennaya teplotekhnika*, – 2015. – Т.37. – №2. – P. 59-66.

5. *Arsenev L.V., Tyiryishkin V.G., Bogov I.A. and other.* *Statsionarnyye gazoturbinnyye ustanovki* // Pod red. L.V. Arseneva, V.G. Tyiryishkina – L.: Mashinostroenie, Leningradskoe otdeleniye, 1989. – 543 p.

Получено 10.08.2015

Received 10.08.2015

УДК 536.24+662.995

ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫРАЩИВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КУЛЬТУР В УКРАИНЕ. ЧАСТЬ 2

Гелетуха Г.Г., канд. техн. наук, Железная Т.А., канд. техн. наук, Трибой А.В.

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

Розглянуто паливні характеристики енергетичних культур. Проаналізовано недоліки енергокультур як палива, запропоновано шляхи пом'якшення їх негативного впливу. Розглянуто сучасний стан та перспективи розвитку даного сектору в Україні. Запропоновано концепцію вирощування енергетичних культур в Україні.

Рассмотрены топливные характеристики энергетических культур. Проанализированы недостатки энергокультур как топлива, предложены пути смягчения их негативного влияния. Рассмотрено современное состояние и перспективы развития данного сектора в Украине. Предложена концепция выращивания энергетических культур в Украине.

Fuel properties of energy crops are considered in the paper. Disadvantages of energy crops as a fuel are analyzed and possible ways for mitigation of their negative influence are suggested. The paper covers state of the art and prospects for the development of the sector in Ukraine. A conception for growing energy crops in the country is suggested.

Бібл. 13, рис. 5.

Ключевые слова: энергетические культуры, энергетические плантации, биомасса, биотопливо, биоэнергетика.

Топливные характеристики энергетических культур

Энергетические культуры используются для получения твердых, жидких и газообразных биотоплив. В данной статье рассматриваются культуры, предназначенные для производства твердых биотоплив – щепы, гранул, брикетов. Топливные характеристики нескольких таких культур представлены в таблице 1. Для сравнения в таблицу также включены данные для соломы зерновых культур и щепы лесной древесины.

Анализ данных таблицы показывает, что характеристики ивы и тополя в целом близки к показателям древесной щепы. Основное отличие – большее содержание азота, что, по-видимому, связано с применением удобрений при выращивании этих культур. Мискантус характеризуется повышенной зольностью, примерно такой, как у соломы. Все рассмотренные энергокультуры имеют достаточно высокую температуру плавления золы, что выгодно отличает их от соломы.

Ниже кратко представлены результаты нескольких работ, посвященных изучению топливных характеристик ряда энергетических культур.

В работе [1] на лабораторном оборудовании выполнено детальное исследование топливных свойств 6 генотипов биомассы ивы с точки зрения возможности их совместного сжигания с углем на электростанциях Великобритании. Отмечено, что положительным свойством ивы как топлива, является сравнительно небольшое содержание золы и азота. Применение удобрений при выращивании культуры должно быть оптимальным, так как оно оказывает влияние на элементный состав биомассы. Например, совместное использование азотных и калийных удобрений приводит к увеличению содержания углерода, что, в свою очередь, положительно влияет на калорийность биомассы. С другой стороны, использование этих же удобрений влияет на содержание азота и калия в иве, что может привести к росту выбросов оксидов азота при сжигании и снижению температуры плавления золы за счет большого количества в ней оксида калия K_2O . Из шести изученных генотипов ивы 5 показали высокую температуру плавления золы (> 1500 °C) и низкую тенденцию к ошлакованию элементов энергетического оборудования.

Табл. 1. Топливные характеристики энергетических культур и других биотоплив [1-10]

Показатели	Мискантус	Ива	Тополь	Солома зерновых культур (для сравнения)	Древесная щепа (для сравнения)
Влажность при сборе, %	15...23	50...53	50...55	15...20	40
$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$, МДж/кг (сух. мас.)	17...19,5	18,5	18,7	~18	~19
Содержание летучих веществ, %	> 78	79	83	> 70	> 70
Зольность, %	2,3...3,7	1,5...2	0,5...1,9	3...4	0,6...1,5
<i>Элементный состав, %:</i>					
C	46,97	50,28	47,95	42...43	50
H	5,57	5,98	5,92	5	6
O	45,82	42,65	45,29	37...38	43
Cl	0,04	0,02...0,03	0,03...0,04	0,2...0,75	0,02
K*	0,46 %	123,3 г/кг золы	0,21	0,2...0,98 %	0,13...0,35 %
N*	0,16...0,57	0,4...1,0	0,77...0,9	0,35...0,41	0,3
S	0,28	0,03...0,34	0,03...0,2	0,13...0,16	0,05
Температура плавления золы, °C	1250...1385	> 1500	1200...1500	950...1000	1000...1400

*Содержание зависит от объема вноса удобрений

Изучение элементного и биохимического состава образцов ивы показало, что генотип с наивысшим содержанием лигнина (27,1 %) имеет наибольшую зольность (2,9...3,2 %). И наоборот, генотип с наименьшим содержанием лигнина (15,5 %) имеет минимальную зольность (1,1...1,4 %). Наибольшую теплоту сгорания имеют генотипы с высоким содержанием углерода и малым содержанием кислорода. В целом, в работе [1] сделан вывод о хороших топливных характеристиках биомассы ивы (за исключением одного генотипа) и перспективности выращивания и использования этого вида биотоплива.

Авторы [2] исследовали топливные характеристики четырех многолетних травянистых энергетических культур – мискантуса, проса прутьевидного, арундо тростникового, артишока испанского в сравнении с «эталонным» топливом – древесными гранулами австрийского производства. По сравнению с древесиной, исследованные многолетние энергокультуры имеют гораздо большую зольность, из них наименьшая – у мискантуса

(2,3 % сух. мас.). Повышенная зольность объясняется метаболизмом быстрого роста (накапливание питательных веществ) и отличной от древесины органической структурой (SiO_2 -фитолиты). Кроме того, на зольность большое влияние оказывает сезон сбора урожая и применяемая технология сбора. Как правило, основными элементами, формирующими золу, являются (в порядке уменьшения значимости) Si, K, Ca, Cl, S. У мискантуса по сравнению с другими культурами содержание Si, K, Ca наименьшее.

Кроме того, исследованные энергокультуры (кроме проса прутьевидного) по сравнению с древесными гранулами характеризуются повышенной потенциальной способностью вызывать коррозию элементов энергооборудования, что отражается показателем $\text{Cl/S} > 1$. Формирование свободного газообразного хлора при сульфатации щелочных или тяжелых металлов в отложениях на трубах котла приводит к явлению коррозии. Особенно неблагоприятным является сочетание $\text{Cl/S} > 1$ при высоком содержании Ca (как у ар-

тишока испанского). Для древесных гранул отношение $Cl/S < 1$. Также энергетические культуры имеют более высокое содержание азота, чем лесная древесина, что приводит к большим выбросам NO_x при горении. Наблюдается тенденция к ошлаковыванию элементов оборудования.

Несмотря на недостатки биотоплива из энергетических культур в сравнении с древесными гранулами, в целом они являются неплохим

топливом, требующим тщательного подхода к использованию. Во многих случаях эти биотоплива могут удовлетворять существующим нормам по выбросам загрязняющих веществ (если только они не являются необоснованно завышенными). Так, например, из данных таблицы 2 видно, что показатели горения щепы мискантуса полностью находятся в пределах австрийских лимитов для эмиссии твердых частиц, оксидов азота и CO .

Табл. 2. Средние показатели эмиссии при горении биотоплива из энергетических культур, mg/nm^3 (13 % O_2 , сух. мас.) [2]

Загрязняющие вещества	Просо прутьевидное	Арундо тростниковый	Мискантус	Древесные гранулы (для сравнения)	Австрийские нормы по выбросам для установок 100...350 кВт
Твердые частицы, всего, в т.ч $< 1 \mu m$ (аэрозоли)	58 50	102 67	27 16	21 16	150
NO_x	368	363	187	106	350*/250**
HCl	18	67	59	3	
SO_2	91	278	53	3	
CO	145	443	55	1	250

* Для химически необработанных древесных отходов

** Для лесной древесины

Для решения проблемы ошлаковывания поверхностей котла при сжигании энергетических культур авторы [2] предлагают снижать температуру горения путем использования охлаждаемых решеток и стенок топки. Другой подход может заключаться в предварительной обработке биомассы – выщелачивание (для удаления проблематичных химических элементов) или добавлении извести для повышения температуры плавления шлаковых отложений. Еще один возможный метод – совместное сжигание энергокультур с древесиной, в результате чего снизится эмиссия HCl, SO_2 , NO_x и твердых частиц.

В работе [3] изучены характеристики горения биомассы нескольких энергетических культур, в том числе ивы, тополя, мискантуса. В основном полученные результаты совпадают с выводами приведенных выше исследований. Ива имеет высокую температуру плавления золы ($> 1500^\circ C$) и наименьшие проблемы с ошлакованием поверхностей энергооборудования. Зольность мисканту-

са (6,7 %) заметно выше зольности ивы (1,9 %) и тополя (1,7 %). Это же относится и к содержанию азота. Наихудшие топливные свойства из рассмотренных культур имеет артишок испанский. В отличие от работы [2] авторы [3] считают, что при сжигании энергетических культур (кроме артишока испанского) не будет возникать серьезных проблем с коррозией элементов энергооборудования, поскольку содержание хлора в этих культурах низкое ($< 0,1 \%$).

Выращивание энергетических культур в Украине

На сегодня в Украине есть несколько компаний, занимающихся выращиванием энергетических культур на коммерческом уровне. Еще ряд компаний планируют в ближайшее время выйти на этот рынок. Некоторые из них кратко описаны ниже.

Компания “Salix Energy”, основанная в 2010 году, имеет наибольшие в Украине плантации энергетической ивы (*Salix Viminalis*), располо-

женные в Волынской и Львовской областях (> 1500 га). Разводятся 6 сортов ивы, в том числе польские, шведские. В 2013 г. компания зарегистрировала свой собственный сорт «Марцияна» (единственный официально зарегистрированный в Украине). На 2014-2015 гг. имеются планы по расширению плантаций ивы до 2,5...3 тыс. га и началу промышленного сбора урожая. «Salix Energy» планирует собирать щепу из энергетической ивы для производства тепловой и электрической энергии на территории Украины [11].

Компания «Phytofuels» выращивает целый ряд энергетических культур (просо прутьевидное, мискантус, ива, сорго сахарное и др.) на площади более 35 тыс. га в Полтавской области. Брикетты и гранулы, произведенные из этих культур, «Phytofuels» поставляет отечественным и зарубежным потребителям. В научных вопросах компания тесно сотрудничает с Институтом биомассы и устойчивого развития (г. Полтава) и Университетом Вагенингена (Нидерланды).

Агрохолдинг KSG Agro, владеющий 65 тыс. га земель в Днепропетровской области, развивает новое направление своего бизнеса – выращивание мискантуса. В 2013 году на 33 га агрохолдинга успешно возшли маточные плантации культуры. На 2014 г. запланирована высадка еще 400 га мискантуса, а еще через год общая площадь под эту энергокультуру должна достичь более 2000 га. Биомасса мискантуса будет использоваться для производства твердого биотоплива.

ООО «Аграрное Содружество» в 2011 г. приступило к реализации проекта по выращиванию энергетической ивы (*Salix viminalis*) и производству топливных гранул из нее. Земельный фонд проекта – 2000 га, расчетная производственная мощность завода – 24 тыс. т/год.

В Украине также проводится широкая научно-исследовательская работа, посвященная энергетическим культурам. Большой вклад в это направление вносит Институт биоэнергетических культур и сахарной свеклы Национальной академии аграрных наук Украины. Так, например, в Институте ведется работа по изучению генофонда ивы рода *Salix L.* различно-

го эколого-географического происхождения по характеристикам продуктивности, пригодности к механизированному уходу и сбору, энергетической ценности. На опытном участке Института высажено 11 видов и 3 гибрида *Salix L.* [12]. Исследуются вопросы урожайности сахарного сорго, мискантуса и других культур. Подготовлен Атлас высокопродуктивных биоэнергетических культур [13].

Несмотря на довольно активное развитие в последние годы выращивания энергетических культур в Украине, существует ряд проблем, требующих разрешения. Одна из них – отсутствие энергокультур в классификаторе сельскохозяйственных культур. На сегодня энергетическая ива включена в классификатор как техническая культура, тогда как мискантуса и других энергокультур там нет вообще. Это может создать юридические и другие проблемы на определенном этапе хозяйственной деятельности производителей этих культур. Кроме того, случается, что производители энергокультур сталкиваются с необходимостью уплаты НДС при оформлении своих отношений с инвестором, тогда как они еще не произвели никакой продукции. Это связано с тем, что продукцией считаются саженцы, выращенные самой компанией для использования на своих же плантациях. Еще одна проблема заключается в том, что производитель энергокультур не считается «сельхозпроизводителем» и не имеет соответствующих льгот (например, по аренде техники), пока он не произвел первую продажу своего урожая. Учитывая, что урожай ивы и тополя собирается каждые 3-4 года, период до первой продажи является достаточно длительным.

Для ускорения развития данного сектора в Украине специалисты Института технической теплофизики НАН Украины считают необходимым внедрить механизмы государственного стимулирования выращивания энергетических культур. Один из предлагаемых механизмов – субсидирование энергоплантаций на уровне 10 тыс. грн./га. Другим инструментом может быть частичное покрытие государством процентных ставок коммерческих банков. Рекомендуются предусмотреть соответствующее финансирование из Госбюджета Украины в

2015-2017 гг.

По оценкам специалистов ИТТФ НАН Украины в стране имеется 3...4 млн. га неиспользуемых сельскохозяйственных земель (по данным 2012 г. – 3,5 млн. га), которые можно задействовать для выращивания энергетических

культур. Рекомендуется для этого направления использовать до 2 млн. га, разделив их (согласно одному из возможных сценариев) между кукурузой на биогаз (1 млн. га), ивой (0,5 млн. га), тополем (0,2 млн. га) и мискантусом (0,3 млн. га). Реализация такого сценария даст возможность

Табл. 3. Концепция ИТТФ НАН Украины для выращивания энергетических культур в Украине

Показатели	2014 г.	2020 г.	2030 г.
Площадь под энергетическими культурами (коммерческие плантации), всего, тыс. га	3	200	1000
<i>Структура площадей по культурам, тыс. га:</i>			
- ива	2	50	250
- мискантус	~0	30	150
- тополь	~0	20	100
- кукуруза (на биогаз)	1	100	500
Урожай энергетических культур (всего), млн. т у.т./год	0,017	1,00	4,98
<i>Структура урожая по культурам, млн. т у.т./год:</i>			
- ива	0,013	0,33	1,66
- мискантус	~0	0,19	0,94
- тополь	~0	0,11	0,54
- кукуруза (на биогаз)	0,004	0,37	1,84
<i>Показатели, используемые в концепции</i>			
Распределение общей площади под энергокультурами, %			
- ива	25		
- мискантус	15		
- тополь	10		
- кукуруза (на биогаз)	50		
Урожайность*, сух. т/га в год:			
- ива	12		
- мискантус	12		
- тополь	9,5		
- кукуруза на биогаз (свежая масса)	30		
Теплота сгорания (сухой массы), МДж/кг:			
- ива	18		
- мискантус	17		
- тополь	18,5		
- кукуруза на биогаз	выход CH ₄ : 100 м ³ /т силоса* содержание CH ₄ в биогазе: 60 %		

* Консервативный подход

ежегодно получать около 3,3 млрд. м³ биомассы ивы, тополя и мискантуса. тана из силоса кукурузы и 6,3 млн. т у.т. за счет

Табл. 4. Техничко-экономические показатели выращивания энергетического тополя в Украине на плантации с 2-х летним оборотом (расчет на 1 га)

Показатели	Без субсидий	С субсидией 620 евро/га на создание плантации
Посадка (покупка саженцев – 6000 шт./га, подготовка почвы), евро/га	1191	571
<i>Первый цикл плантации (года 1...2):</i>		
- уход за плантацией (культивация, боронование, полив), евро/га		306
- сбор урожая и доставка биомассы потребителю*, евро/га		335
- урожайность**, т/га		40
- отпускная цена биомассы, евро/т		25 (400 грн./т)
- доход от продажи биомассы, евро/га		994
<i>Возврат инвестиций после 1-го сбора урожая (суммарный доход/суммарные затраты)</i>	0,54	0,82
<i>Второй цикл плантации (года 3...4):</i>		
- уход за плантацией (боронование, полив, применение пестицидов), евро/га		265
- сбор урожая и доставка биомассы потребителю, евро/га		353
- урожайность, т/га		42
- отпускная цена биомассы, евро/т		25 (400 грн./т)
- доход от продажи биомассы, евро/га		1049
<i>Возврат инвестиций после 2-го сбора урожая (суммарный доход/суммарные затраты)</i>	0,83	1,12
<i>Циклы 3...7 (года 5...14):</i>		
- уход за плантацией, евро/га		1323
- сбор урожая и доставка биомассы потребителю, евро/га		1766
- урожайность, т/га		42
- отпускная цена биомассы, евро/т		25 (400 грн./т)
- доход от продажи биомассы, евро/га		5245
- ликвидация плантации, евро/га		100
<i>Весь период существования плантации (14 лет):</i>		
- средняя урожайность за год, т/га	27	27
- суммарные затраты, евро/га	5639	5019
- суммарный доход, евро/га	7288	7288
- общая прибыль (разность дохода и затрат), евро/га	1649	2269
- суммарный доход/суммарные затраты	1,29	1,45

* Здесь и далее в таблице – доставка в радиусе 30 км

** Здесь и далее в таблице – биомасса с влажностью при сборе (W 55 %)

С учетом разработанных ИТТФ концепций развития различных секторов биоэнергетики, считаем, что общая площадь для выращивания энергетических культур в Украине может составить около 200 тыс. га в 2020 г. и до 1 млн. га в 2030 г. (табл. 3). Соответственно, урожай этих культур будет эквивалентен 1 млн. т у.т. в 2020 г. и около 5 млн. т у.т. в 2030 г.

Важным вопросом являются экономические показатели выращивания энергокультур, такие как удельные затраты на создание плантации и уход за ней, доход от реализации урожая, период возврата инвестиций и другие. Результаты предварительного технико-экономического обоснования выращивания энергетического тополя с 2-х летним циклом сбора урожая в Украине представлены в таблице 4.

Из данных таблицы видно, что при отпускной цене биомассы 400 грн./т возврат инвестиций (то есть отношение суммарного дохода к суммарным затратам) составляет после 1-го сбора урожая 0,54, после 2-го сбора урожая – 0,83, за весь срок существования плантации (14 лет, 7 циклов) – 1,29. Это означает, что простой срок окупаемости проекта по выращиванию тополя составляет около 6 лет. При наличии государственной субсидии на создание плантации тополя в размере 10 тыс. грн./га (620 евро/га) возврат инвестиций после 1-го цикла составит 82 %, после второго – 112 %, за весь срок существования плантации – 145 %. То есть в данном случае простой срок окупаемости проекта – до 4 лет. Для окупаемости плантации после 2-го сбора и продажи урожая (т.е. в течение 4-х лет), цена биомассы должна составлять около 480 грн./т при отсутствии субсидий и 360 грн./т при наличии субсидии в 10 тыс. грн./га (620 евро/га).

Оценка необходимой величины субсидий из Госбюджета Украины на выращивание энергокультур выполнена на примере ивы для 2014-2016 гг., исходя из прогнозируемого объема замещения природного газа биомассой при производстве тепловой энергии – 250 млн. м³ (2014 г.), 500 млн. м³ (2015 г.), 1 млрд. м³ (2016 г.). Результаты показывают, что если энергетические культуры составляют 20 % всего объема ис-

пользуемой биомассы, то общая сумма необходимой субсидии на энергоплантации – 84...338 млн. грн./год (табл. 5). При этом доля субсидии от стоимости природного газа, замещаемого энергокультурами, составляет 38 %.

Выводы

Несмотря на ряд недостатков биотоплива из энергетических культур в сравнении с древесными гранулами, в целом энергокультуры являются неплохим топливом, требующим тщательного подхода к использованию. Во многих случаях эти биотоплива могут удовлетворять существующим нормам по выбросам загрязняющих веществ (если только они не являются необоснованно завышенными).

На сегодня в Украине есть несколько компаний, занимающихся выращиванием энергетических культур на коммерческом уровне. Еще ряд компаний планируют в ближайшее время выйти на этот рынок. Для ускорения развития данного сектора в Украине специалисты ИТТФ НАН Украины считают необходимым внедрить механизмы государственного стимулирования выращивания энергетических культур. Один из предлагаемых механизмов – субсидирование энергоплантаций на уровне 10 тыс. грн./га. Другим инструментом может быть частичное покрытие государством процентных ставок коммерческих банков. Рекомендуется предусмотреть соответствующее финансирование из Госбюджета Украины в 2015-2017 гг.

По оценкам ИТТФ, в Украине имеется 3...4 млн. га неиспользуемых сельскохозяйственных земель, которые можно задействовать для выращивания энергетических культур. Рекомендуется для этого направления использовать до 2 млн. га, разделив их (согласно одному из возможных сценариев) между кукурузой на биогаз (1 млн. га), ивой (0,5 млн. га), тополем (0,2 млн. га) и мискантусом (0,3 млн. га). Реализация такого сценария даст возможность ежегодно получать около 3,3 млрд. м³ биометана из силоса кукурузы и 6,3 млн. т у.т. за счет биомассы ивы, тополя и мискантуса.

Согласно концепции ИТТФ, общая площадь для выращивания энергетических культур в Украине может составить около 200 тыс. га

в 2020 г. и до 1 млн. га в 2030 г. Соответственно, урожай этих культур будет эквивалентен 1 млн. т у.т. в 2020 г. и около 5 млн. т у.т. в 2030 г.

Оценка необходимой величины субсидий из Госбюджета Украины на выращивание энергокультур выполнена на примере ивы для 2014-2016 гг., исходя из прогнозируемого объема замещения природного газа биомассой при производстве тепловой энергии –

250 млн. м³ (2014 г.), 500 млн. м³ (2015 г.), 1 млрд. м³ (2016 г.). Результаты показывают, что если энергетические культуры составляют 20 % всего объема используемой биомассы, то общая сумма необходимой субсидии на энергоплантации – 84...338 млн. грн./год. При этом доля субсидии от стоимости природного газа, замещаемого энергокультурами, составляет 38 %.

Табл. 5. Расчет необходимой субсидии из Госбюджета Украины на выращивание энергетических культур (на примере ивы)

Показатели	2014 г.	2015 г.	2016 г.
Прогнозируемый объем замещения природного газа биотопливом, млн. м ³	250	500	1000
Калорийность биотоплива (щепа) (при W 40 %), МДж/кг	10	10	10
Период эксплуатации котельной, суток	185	185	185
Потребность в биотопливе (при W 40 %), тыс. т	844	1688	3375
Доля энергокультур (ива) в общем объеме используемого биотоплива, %	20	20	20
Урожайность ивы (влажная масса), т/га/год	20	20	20
Необходимая площадь плантации ивы, тыс. га	8,4	16,9	33,8
Необходимая дотация из Госбюджета Украины на создание энергоплантаций,	тыс. грн./га млн. грн.	10 168,8	10 337,5
Стоимость замещаемого энергетической ивой природного газа (при цене 380 \$/1000 м ³), млн. грн.	225	450	900
Доля необходимой субсидии на энергокультуры от стоимости природного газа, замещаемого ивой	38 %	38 %	38 %

W – влажность (по массе)

ЛИТЕРАТУРА

1. *B.A. Gudka*. Combustion characteristics of some imported feedstocks and short rotation coppice (SRC) willow for UK power stations, 2012

http://etheses.whiterose.ac.uk/3352/1/Combustion_Characteristics_of_some_Imported_Feedstocks_and_SRC_willow_for_UK_power_stations.pdf

2. *J. Dahl, I. Obernberger*. Evaluation of the combustion characteristics of four perennial energy crops (*Arundo Donax*, *Cynara Cardunculus*, *Miscanthus x Giganteus* and *Panicum Virgatum*). Proc. of 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May

2004, Rome, Italy, P. 1265 – 1270

3. *E. Karampinis, D. Vamvuka, S. Sfakiotakis et al.* Comparative Study of Combustion Properties of Five Energy Crops and Greek Lignite // *Energy & Fuels*, 2012, N 26(2), P. 869 – 878.

http://www.researchgate.net/publication/224437353_A_Comparative_Study_of_Combustion_Properties_of_Five_Energy_Crops_and_Greek_Lignite

4. *Energy from field energy crops – a handbook for energy producers*. AEBIOM, 2009

<http://www.aebiom.org/wp-content/uploads/file/Publications/Handbook%20for%20energy%20>

producers.pdf

5. *L. Nikolaisen, C. Nielsen, M.G. Larsen et al.* Straw for energy production. Technology – Environment – Economy. The Centre for Biomass Technology, Denmark. 1998.

6. *K. Suadicani, A. Evald, H. H. Jakobsen.* Wood chips for energy production. Technology – Environment – Economy. The Centre for Biomass Technology, Denmark. 1993.

7. *Блюм Я.Б., Гелетуха Г.Г., Григорюк И.П. и др.* Новейшие технологии биоэнергоконверсии. – К: «Аграр Медиа Групп», 2010. – 326 с.

8. *New dedicated energy crops for solid biofuels.* AEBIOM, FP6 RESTMAC project, 2008

http://www.aebiom.org/IMG/pdf/Dedicated_energy_crops_for_solid_biofuels_2008_January.pdf

9. *M. Wachendorf.* Thermal use of agricultural biomass. BOVA course “Energy Crops and Biogas Production, 3-7 March 2008, Tartu, Estonia

http://www.bioenergybaltic.ee/bw_client_files/bioenergybaltic/public/img/File/BOVA/

[Wachendorf_thermal_use_of_agricultural_biomass.pdf](#)

10. *T. van der Sluis, R. Poppens, P. Kraaijvliet et al.* Reed harvesting from wetlands for bioenergy. Alterra report 2460, 2013

http://www.switchgrass.nl/upload_mm/a/5/9/99e205b9-c2ea-4274-a1f8-8e94047094e0_Reed%20report%20Pellets%20for%20Power%202460%20October%202013.pdf

11. *Гнап И.В.* Выращивание энергетической вербы на Волыни: результаты за первые 3 года. Презентация на семинаре “GREENEXPO. Альтернативная энергетика», 18 октября 2013 г., Киев.

12. *Роїк М.В., Гументик М.Я., Мамайсур В.В.* Перспективи вирощування енергетичної верби для виробництва твердого біопалива // Біоенергетика, № 2, 2013, С. 18 – 19.

13. *Гументик М.Я.* Атлас високопродуктивних біоенергетичних культур // Біоенергетика, № 2, 2013, С. 6 – 7.

PROSPECTS FOR GROWING AND USE OF ENERGY CROPS IN UKRAINE. PART 2

Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Tryboi O.V.

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

Fuel properties of energy crops are considered in the paper. Disadvantages of energy crops as a fuel are analyzed and possible ways for mitigation of their negative influence are suggested. It is shown that despite some disadvantages of energy crops as compared to wood pellets, on the whole they are a good fuel, which requires well thought-out approach to its use. In many cases the biofuels can meet existing emission limits (unless they are unduly strict). The paper also covers state of the art and prospects for the development of the sector in Ukraine. A conception for growing energy crops in the country is suggested. To push development of the sector in the Ukraine the authors consider it necessary to introduce state support for growing energy crops. One of the possible mechanisms is a subsidy for creation of energy crop plantation; another instrument may be partial covering commercial rate interest by the state. References 13, table 5.

Key words: energy crops, energy plantations, biomass, biofuels, bioenergy.

1. *B.A. Gudka*. Combustion characteristics of some imported feedstocks and short rotation coppice (SRC) willow for UK power stations, 2012

http://etheses.whiterose.ac.uk/3352/1/Combustion_Characteristics_of_some_Imported_Feedstocks_and_SRC_willow_for_UK_power_stations.pdf

2. *J. Dahl, I. Obernberger*. Evaluation of the combustion characteristics of four perennial energy crops (*Arundo Donax*, *Cynara Cardunculus*, *Miscanthus x Giganteus* and *Panicum Virgatum*). Proc. of 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy, p. 1265-1270

3. *E. Karampinis, D. Vamvuka, S. Sfakiotakis et al.* Comparative Study of Combustion Properties of Five Energy Crops and Greek Lignite // *Energy & Fuels*, 2012, N 26(2), p. 869–878.

http://www.researchgate.net/publication/224437353_A_Comparative_Study_of_Combustion_Properties_of_Five_Energy_Crops_and_Greek_Lignite

4. *Energy from field energy crops – a handbook for energy producers*. AEBIOM, 2009

<http://www.aebiom.org/wp-content/uploads/file/Publications/Handbook%20for%20energy%20producers.pdf>

5. *L. Nikolaisen, C. Nielsen, M.G. Larsen et al.* Straw for energy production. Technology – Environment – Economy. The Centre for Biomass Technology, Denmark. 1998.

6. *K. Suadicani, A. Evald, H. H. Jakobsen*. Wood chips for energy production. Technology – Environment – Economy. The Centre for Biomass Technology, Denmark. 1993.

7. *Blium Ya.B., Geletukha G.G., Grygoriuk I.P. et al.* Modern technologies for bioenergy conversion. – K: “Agrar Media Group”, 2010. – 326 p. (Ukr.)

8. *New dedicated energy crops for solid biofuels*. AEBIOM, FP6 RESTMAC project, 2008

http://www.aebiom.org/IMG/pdf/Dedicated_energy_crops_for_solid_biofuels_2008_January.pdf

9. *M. Wachendorf*. Thermal use of agricultural biomass. BOVA course “Energy Crops and Biogas Production, 3-7 March 2008, Tartu, Estonia

http://www.bioenergybaltic.ee/bw_client_files/bioenergybaltic/public/img/File/BOVA/Wachendorf_thermal_use_of_agricultural_biomass.pdf

10. *T. van der Sluis, R. Poppens, P. Kraaisvitnii et al.* Reed harvesting from wetlands for bioenergy. Alterra report 2460, 2013

http://www.switchgrass.nl/upload_mm/a/5/9/99e205b9-c2ea-4274-a1f8-8e94047094e0_Reed%20report%20Pellets%20for%20Power%202460%20October%202013.pdf

11. *Gnap I.V.* Growing willow for energy at Volyn: results of the first 3 years. Presentation at the seminar “GREENEXPO. Alternative energy», 18 October 2013, Kyiv. (Ukr.)

12. *Roik M.V., Gumentik M.Ya., Mamaysur V.V.* Prospects for the cultivation of energy willow for solid biofuel production // *Bioenergy*, № 2, 2013, p. 18-19. (Ukr.)

13. *Gumentik M.Ya.* Atlas of the high-productive energy crops // *Bioenergy*, № 2, 2013, p. 6-7. (Ukr.)

Получено 24.10.2014

Received 24.10.2014

УДК 621.643

МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ БУДІВЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛООВОГО НАСОСА ТИПУ «ПОВІТРЯ-РІДИНА»

Басок Б. І., чл.-кор. НАН України, Недбайло О.М., канд. техн. наук, Ткаченко М.В., Божко І.К., Лисенко О.М., Луніна А.О.

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

Наведений опис оригінального технічного рішення щодо використання теплового насоса для опалення частини адміністративної будівлі. Розроблена гідравлічна схема підключення та виконаний підбір теплотехнічного обладнання до неї. Проаналізована енергетична ефективність використання теплового насоса в опалювальний період.

Приведено описание оригинального технического решения относительно использования теплового насоса для отопления части административного здания. Разработана гидравлическая схема подключения и выполнен подбор теплотехнического оборудования к ней. Проанализирована энергетическая эффективность использования теплового насоса в отопительный период.

The description of original technical decision of using heat pump for heating part of administrating building is described. The hydraulic connection scheme is developed and selectin of heat devices is executed for it. The energy efficiency for using heat pump in heating season is analyzed.

Бібл. 5, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: тепловий насос, енергозбереження, система опалення, індивідуальний тепловий пункт.

Вступ.

Енергозбереження за рахунок підвищення ефективності використання енергії та залучення в енергетичний баланс відновлювальних низькопотенційних джерел енергії є одним з найважливіших завдань для комунальної теплоенергетики України. Впровадження таких новітніх технологій, зокрема із застосуванням теплових насосів, дозволить значно скоротити обсяги споживання органічних паливних ресурсів та замінювати їх природними джерелами теплоти.

Забезпечення тепlopостачання будинків різного призначення на основі технологій із використанням теплових насосів є найбільш поширеним у сучасній світовій альтернативній енергетиці. Такі системи характеризуються високою енергетичною ефективністю, автономністю від тепlopостачальних мереж, а також екологічною безпекою технології та обладнання, що використовуються.

В Інституті технічної теплофізики впроваджено ряд проектів, що мають за мету скорочення споживання теплової енергії на потреби опалення адміністративних будівель. Се-

ред таких проектів – розробка та встановлення індивідуального теплового пункту (ІТП) оригінальної конструкції [1], модернізація частини системи опалення корпусу №1 з встановленням теплового насоса типу «грунт-вода» та типу «повітря-вода» [2] та ін.

Основні результати. На рис. 1 представлена принципова гідравлічна схема модернізації існуючої централізованої системи опалення триповерхової адміністративної будівлі корпусу №1 ІТТФ НАН України з використанням теплового насоса «повітря-вода». Фотографія оригінальної схеми підключення теплового насоса показана на рис. 2. Трубна система із приладами вимірювання, контролю та автоматики розміщена у виставковій залі інституту.

Модернізація системи опалення здійснена шляхом інтеграції теплового насосу 7 IVT Optima 1700 (Швеція) (рис. 3) типу «повітря-вода» вихідною тепловою потужністю 16 кВт в існуючу систему централізованого опалення будівлі. Модернізована система може працювати як від індивідуального теплового пункту, використовуючи теплоту як від районної котельні

або ТЕЦ за класичною схемою, так і від теплового насоса. При роботі системи за традиційною проектною схемою для уникнення забруднення трубопроводів та опалювальних приладів від

теплоносія, що надходить з теплової мережі встановлено барботажний сепаратор бруду і газів 2 Spirovent.

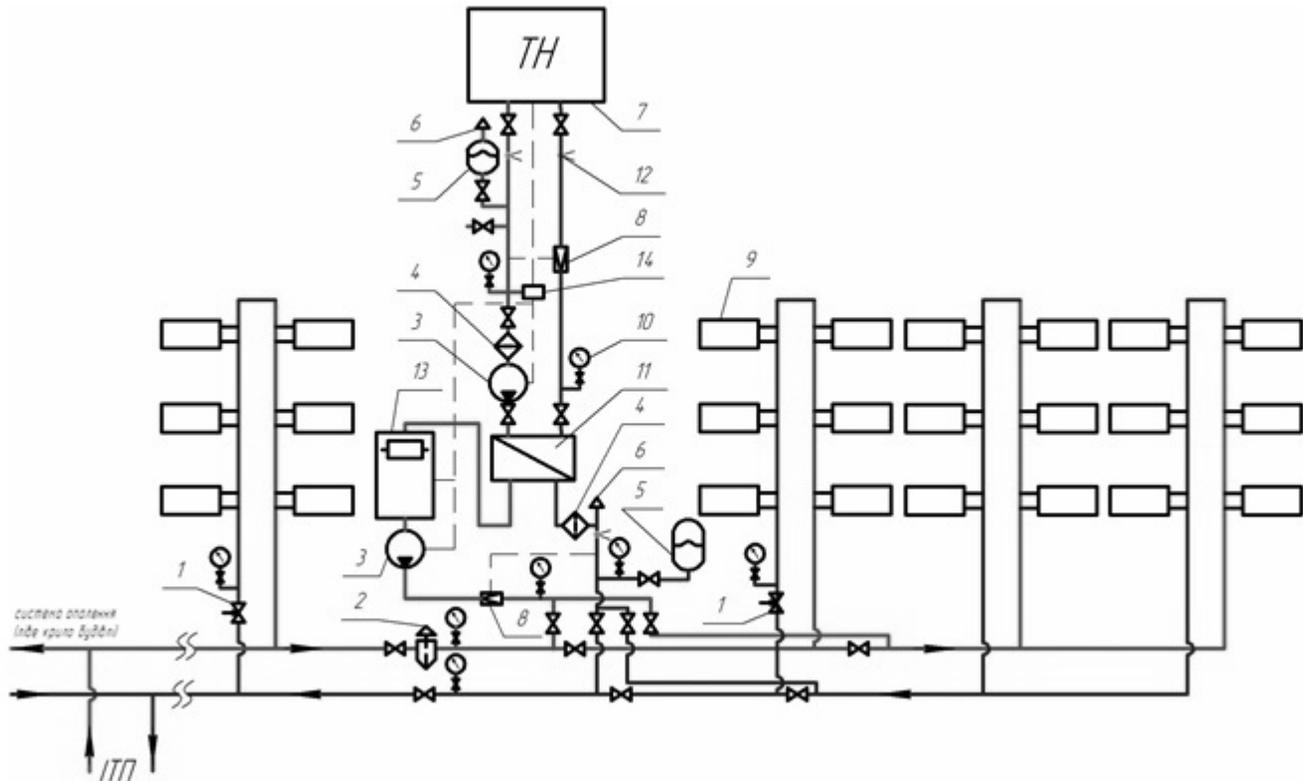


Рис. 1. Принципова схема модернізації системи опалення, тут:

- 1 – клапани балансувальні; 2 – барботажний сепаратор; 3 – циркуляційні насоси;**
- 4 – фільтри сітчасті; 5 – баки розширювальні мембранні; 6 – повітроспускники;**
- 7 – тепловий насос «повітря-вода» (ТН); 8 – лічильник теплоти;**
- 9 – радіатор системи опалення; 10 – манометр; 11 – пластинчатий теплообмінник,**
- 12 – датчики температури; 13 – електричний котел; 14 – датчик тиску.**

При роботі системи від теплового насоса частина контуру типової системи опалення радіаторного типу відключається від індивідуального теплового пункту за допомогою запірної арматури, при цьому для гідравлічного урівноваження циркуляції по стояках старої системи передбачені балансувальні клапани 1.

Оскільки частина трубопроводів від теплового насоса проходить ззовні будівлі, тому для уникнення замерзання в них теплоносієм є водний розчин пропіленгліколю «Тепро-20» ТУ В 24.1-2464717949-001:2005, який має здатність не замерзати до температури – 22 °С. Контур з розчином пропіленгліколю (те-

плового насоса) гідравлічно роз'єднано з контуром системи опалення через пластинчатий теплообмінник 10 Alfa Laval. При цьому, можливе опціональне відключення від теплової мережі шістьох або чотирьох стояків (в залежності від необхідності підтримування теплового режиму будівлі) із радіаторами 9 за допомогою запірної арматури.

При роботі установки на шість стояків, загальна опалювана площа складає 288 м². Підтримання нормативної температури при опаленні приміщень такої площі тепловим насосом можливо лише в перехідні періоди – жовтень та квітень, коли середньомісячна температура

в м. Києві відповідно 7, 9 °С та 8, 9 °С [3], при якій мінімальні теплові втрати будівлі та максимальна теплопродуктивність ТН. При роботі теплового насоса на 4 стояки системи опалення, опалювана площа становить 162 м², що дозволяє використовувати тепловий насос для теплозабез-

печення протягом всього опалювального періоду.

Зовнішній блок теплового насоса встановлено якомога ближче до приміщень, які він буде опалювати, на даху входу до корпусу. Також здійснено обов'язкове утеплення магістральних трубопроводів для мінімізації теплових втрат.



Рис. 2. Оригінальна схема підключення теплового насоса типу «повітря-рідина».

Перед запуском модернізованої системи теплопостачання була виконана ретельна промивка старої системи опалення барботажним способом із застосуванням бульбашкового водоповітряного потоку та хімічних реактивів для видалення відкладень. При заповненні контурів та їх роботі повітря видаляється за допомогою повітряспусників 6. Циркуляція в обох контурах із заданої витратою забезпечується, відповідно, насосами 3 Wilo-Star-RS 25/6 (контур системи опалення) та Wilo-Top-S 25/10 (контур теплового насоса) з очищенням теплоносія у сітчастих фільтрах грубої очистки 4. Передбачене автоматичне відключення циркуляційних та теплового насосів за допомогою датчику тиску 14 у разі

розгерметизації контурів та втраті тиску. Для компенсації об'ємного розширення теплоносія застосовуються дві ємкості 5, об'ємом 4 (контур теплового насоса) та 50 літрів (контур системи опалення). Об'єм баків розраховано відповідно до об'єму теплоносія в контурі, його коефіцієнта температурного розширення та температурного графіка роботи системи опалення.

Вимірювання кількості теплоти, яка витрачається для опалення приміщень, здійснюється окремо у кожному з контурів тепловими лічильниками 8, що дає змогу оцінити втрати теплоти у магістральних трубопроводах та ефективність роботи теплообмінника. Електричний котел 13 «Еко-Компакт»



Рис. 3. Тепловий насос IVT Optima 1700.

К-6/6-380 (Україна) тепловою потужністю 6 кВт призначений для резервного (аварійного) та пікового теплопостачання у разі неможливості роботи теплового насоса або в якості додаткового нагрівача при його недостатній теплопродуктивності. Для проведення досліджень ефективності роботи теплового насосу температура теплоносія у прямому та зворотному трубопроводах обох контурів вимірюється термоперетворювачами типу ТСП-002к та реєструється вторинними контрольними приладами. Для автоматизації роботи теплового насосу використовуються датчики температури:

- зовнішнього повітря,
- повітря у середині приміщення,
- теплоносія у прямому та зворотному трубопроводах.

Інтервал роботи теплового насоса показаний на рис. 4. Витрата теплоносія у контурі ТН складала 2,1 м³/год. Витрата теплоносія у опалювальному контурі, відповідно, 18,2 м³/год.

На рис. 5 приведено інтервал роботи індивідуального теплового пункту [4].

Порівнюючи вищевказані два графіки (рис. 4 та рис. 5) можна зробити наступні висновки:

- експериментальна установка на основі теплового насоса «повітря-вода» та індивідуальний тепловий пункт оригінальної конструкції забезпечують надходження необхідної кількості теплової енергії для підтримання нормативних значень температури внутрішнього повітря;

- обидві установки працюють на принципі багатократного збільшення циркуляції теплоносія контуру опалювальних приладів;

- найбільші показники економії теплової енергії припадають на «перехідний» період, коли температура навколишнього повітря близька, чи вища за нуль градусів. Це зумовлено тим, що в цей період тепловий насос має найвищий показник коефіцієнту перетворення енергії.

За експериментальними даними були обчислені середні питомі теплові втрати будівлі та встановлена економія теплової енергії при використанні теплового насосу типу «повітря-вода»[5]. Всі дані зведені до таблиці 1.

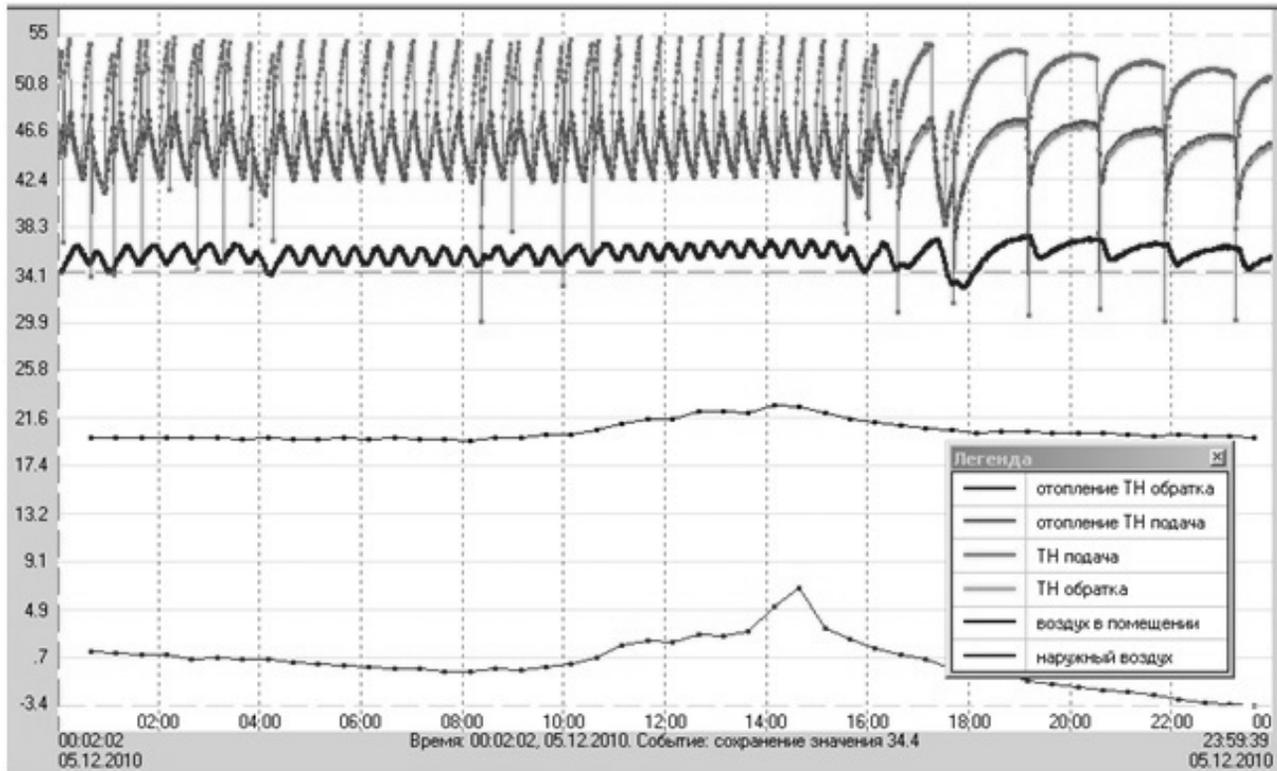


Рис. 4. Интервал работы теплового насоса.

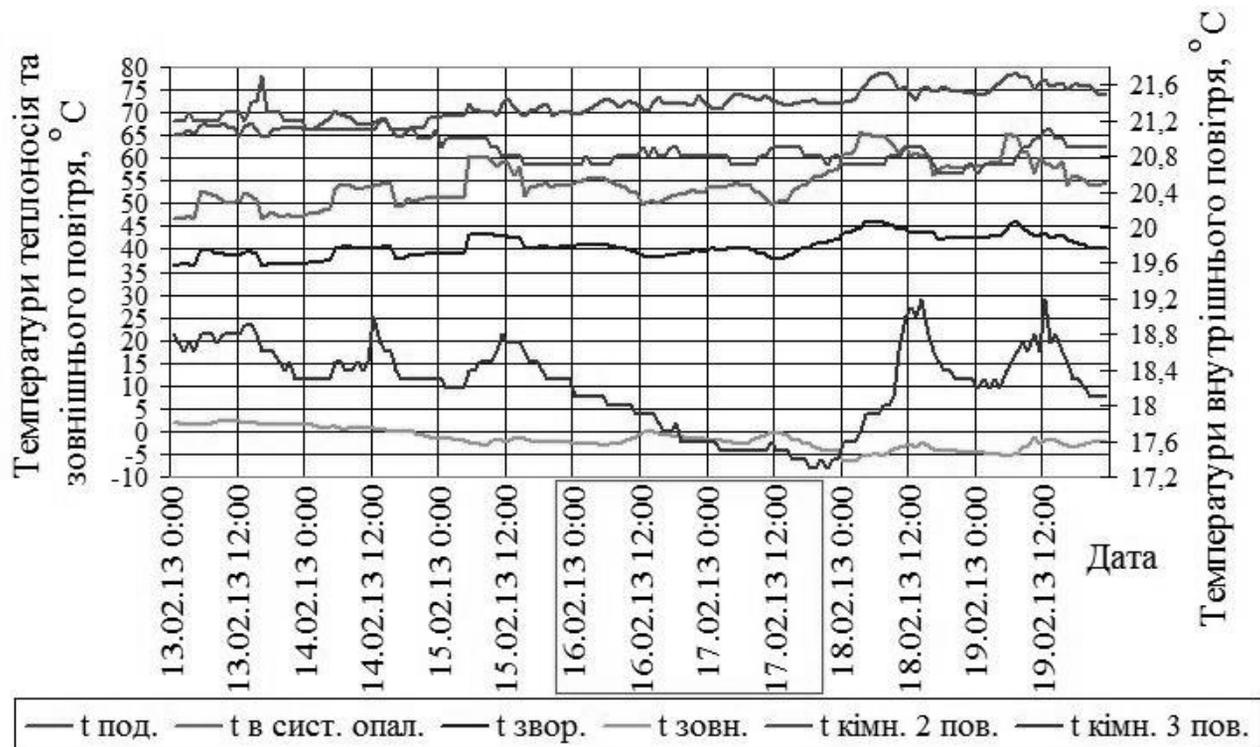


Рис. 5. Интервал работы индивидуального теплового пункта.

Таблиця 1. Розрахунковий економічний ефект від встановлення теплового насосу потужністю 16 кВт в будівлі з максимальними тепловтратами 208 кВт

Місяць року	жовтень	листопад	грудень	січень	лютий	березень	квітень
Середньомісячна температура в м. Києві, °С	7,9	1,8	-2,0	-4,3	-3,3	1,3	8,9
Вихідна потужність теплового насосу, кВт	15	13	11,5	11	11,3	12,8	15,5
Середні питомі тепловтрати будівлі, кВт	65	80	100	110	107	97	65
Економія теплової енергії, %	23	16	11	10	10	13	24

Виходячи з даних в табл. 1 – за опалювальний період середня економія теплової енергії при встановленні теплового насосу потужністю 16 кВт, в адміністративній будівлі, становить близько 15 %. Тому доцільно використовувати теплові насоси при реконструкції, термомодернізації та будівництві нових громадських та адміністративних будівель різного призначення (школи, дитячі садки, корпуси інститутів та ін.).

ЛІТЕРАТУРА

1. Лисенко О.М. Оцінка окремих режимів експлуатації індивідуального теплового пункту // Пром. теплотехніка. – 2012. – Т. 34, № 7. – С. 95-99.
 2. Б.І. Басок, Т.Г. Беляєва, А.Р. Коба, М.В. Ткаченко, О.М. Недбайло, М.А. Хибина, А.О. Луніна, І.О. Кочешев, Ю.Є. Ніколаєнко. Комплексна модернізація типової системи теплопостачання будівлі на основі використання теплового насосу типу «повітря-вода» // Пром. теплотехни-

ка. – 2009. – Т. 31, № 7. – С. 19-21.

3. *Справочник по климату СССР*. Вып. 10, Часть II. Температура воздуха и почвы. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 608 с.

4. Басок Б.І., Лисенко О.М., Приємченко В.П., Андрейчук С.В. Особливості теплозабезпечення адміністративної будівлі на основі індивідуального теплового пункту // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України – 2013. – Вип. 77. – К: ДП НДІБК. – С. 184-188.

5. Долінський А.А., Басок Б.І., Беляєва Т.Г. та ін. Система автономного опалення з використанням теплового насосу на базі централізованого теплопостачання // Патент України на корисну модель U2009 №13243.

MODERNIZATION OF BUILDING'S HEATING SYSTEM USING HEAT PUMP TYPE "AIR-LIQUID"

Basok B.I., Nedbaylo A.N., Tkachenko M.V., Bozhko I.K., Lysenko O.N., Lunina A.A.

Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, 03680, Ukraine, Kyiv. Str. Zhelyabova 2a.

The description of original technical decision of using heat pump for heating part of administrating building is described. The hydraulic connection scheme is developed and selection of heat devices is executed for it. The energy efficiency for using heat pump in heating season is analyzed.

References 5, tables 1, figures 5.

Key words: heat pump, energy, heating, individual heating unit.

1. *Lysenko O.N.* Evaluation of individual operating modes Heating Substations // *Prom. heating engi-neer.* – 2012. – Vol 34, № 7. – P. 95-99.

2. *B.I. Basok, T.G. Belyaeva, A.R. Koba, M.V. Tkachenko, A.N. Nedbaylo, M.A. Hybyna, A.O. Lunina, I.A. Kocheshev, J.E. Nikolaenko.* Complex modernization typical building heating system through the use of heat pump type "air-water" // *Prom. teplotehnyka.* – 2009 – Vol 31, №7. – P. 19-21.

3. *Directory on climate USSR.* Vol. 10, Part II. The temperature of air and soil. – L.: Gidrometeoizdat, 1987. – 608 p.

4. *Basok B.I., Lysenko O.N., Pryyemchenko V.P., Andreychuk S.V.* Features heating administrative building on the basis of individual heating unit // *Building structures: Interdepartmental scientific and technical collection of scientific works (construction) /State Enterprise "State Research Institute of Building Constructions" of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine* – 2013. – Vol. 77 – K: SE NIISK. – P. 184-188.

5. *Dolinsky A.A., Basok B.I., Belyaeva T.G. etc.* Indirect heating using heat pump based district heating // *Patent of Ukraine for useful model U2009 №13243.*

Получено 04.08.2015

Received 04.08.2015

УДК 621.036.7

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДОГРЕВА ВОДЫ И ДУТЬЕВОГО ВОЗДУХА КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Фиалко Н.М., чл.-корр. НАН Украины, Навродская Р.А., канд. техн. наук, Степанова А.И., канд. техн. наук, Гнедаш Г.А., канд. техн. наук

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

Викладено результати аналізу ефективності та оптимізації режимних параметрів теплоутилізаторів котельної установки, призначених для підігрівання води та дутьового повітря.

Изложены результаты анализа эффективности и оптимизации режимных параметров теплоутилизаторов котельной установки, предназначенных для подогрева воды и дутьевого воздуха.

There are exposed results of analysis for efficiency and optimization of working parameters of thermoutilyzers of boiler plant for heating of water and combustion air.

Библ. 6, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: теплоутилизационная установка, оптимизация, критерий эффективности.

c_p – удельная изобарная теплоемкость;
 E_p – эксергетическая мощность;
 G – массовый расход теплоносителя;
 i – удельная энтальпия;
 m – масса;
 p – давление;
 p_s – давление насыщенного пара;
 Q – тепловая мощность;
 R – газовая постоянная;
 s – удельная энтропия;
 T – абсолютная температура;
 t – температура;
 W – влагосодержание;

v – удельный объем;
 μ – молекулярная масса;
 ρ – плотность.

Индексы верхние:

дг, вод, возд, п – дымовые газы, вода, воздух, пар;
 внут – внутренний.

Индексы нижние:

вх, вых – входной, выходной параметры;
 о – окружающая среда;
 пот – потери.

Обеспечение энергосбережения и экологической безопасности за счет повышения эффективности энергетических объектов является важным направлением развития экономики и социальной сферы в Украине на ближайшее время и на дальнейшую перспективу. Один из важнейших этапов в этом направлении – разработка и внедрение на предприятиях коммунальной энергетики эффективных теплоутилизационных технологий. Среди причин, которые сдерживают широкое внедрение существующих технологий, предназначенных для подогрева обратной теплосетевой воды, является их недостаточная эффективность при определенных режимах эксплуатации. Речь идет об

ограниченности работы теплоутилизационных установок в конденсационном режиме, то есть с глубокой утилизацией теплоты, в продолжении всего отопительного периода. Современное состояние проблемы характеризуется тенденцией к разработке и внедрению новых теплоутилизационных установок, в которых осуществляется комбинированное использование утилизированной теплоты для подогрева обратной теплосетевой воды и более холодного теплоносителя, например, сырой воды системы химводоочистки (ХВО) или дутьевого воздуха. Такие установки позволяют осуществлять глубокую утилизацию теплоты в продолжении всего отопительного периода.

Для анализа эффективности и оптимизации теплоутилизационных установок различного типа могут быть использованы эксергетический подход и метод многоуровневой оптимизации [1-3]. В работах [2, 4] проведен анализ эффективности теплоутилизационных установок, одна из которых предназначена для подогрева обратной теплосетевой воды, а вторая – для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха. При этом показаны преимущества метода многоуровневой оптимизации, использование которого при решении оптимизационных задач позволяет рассчитать значения режимных и конструкционных параметров, максимально приближенные к оптимальным, что повышает эффективность теплоутилизационной установки, в среднем, на 2,5 %.

Для более рационального использования

метода многоуровневой оптимизации целесообразно провести анализ эффективности и оптимизацию режимных параметров отдельных элементов установок, изменение эксергетических потерь в которых наиболее сильно влияет на изменение эффективности системы в целом. Предварительная оптимизация параметров таких элементов, находящихся на определенных уровнях оптимизации в блок-схеме многоуровневой оптимизации, позволит использовать полученные для них значения оптимальных параметров в качестве начальных параметров для решения локальных оптимизационных задач других уровней. В процессе решения общей оптимизационной задачи значения оптимальных параметров отдельных элементов установки могут быть уточнены. Такой подход позволяет не только оценить

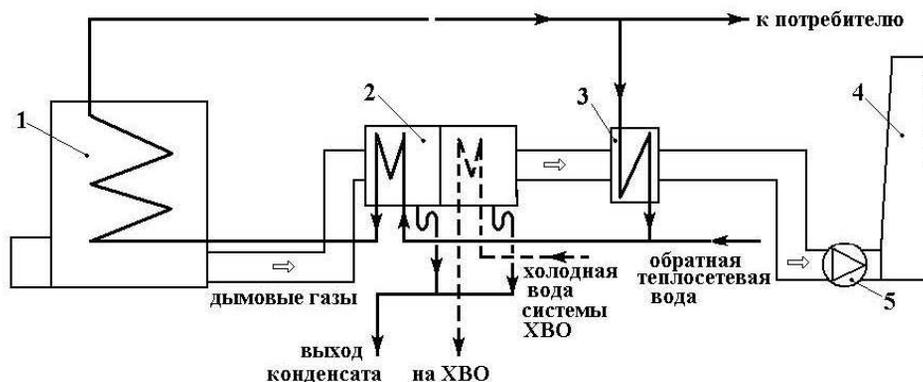


Рис. 1. Принципиальная схема теплоутилизационной установки с использованием водогрейного теплоутилизатора: 1 – котел; 2 – подогреватель воды теплосети и системы ХВО; 3 – газоподогреватель; 4 – дымовая труба; 5 – дымосос.

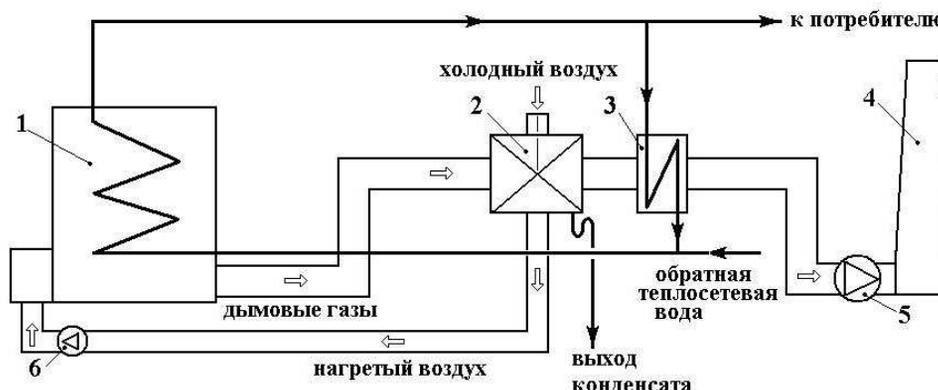


Рис. 2. Принципиальная схема теплоутилизационной установки с использованием воздухогрейного теплоутилизатора: 1 – котел; 2 – воздухоподогреватель; 3 – газоподогреватель; 4 – дымовая труба; 5 – дымосос; 6 – вентилятор.

теплотехническое и термодинамическое совершенство отдельных элементов теплоутилизационной установки и провести анализ их эффективности, но и повысить точность решения общей оптимизационной задачи, а также уменьшить объем расчетов.

Цель работы – оптимизация и анализ эффективности поверхностных теплоутилизаторов котлов: конденсационных водоподогревателя и воздухоподогревателя, предназначенных соответственно для подогрева воды различного назначения и дутьевого воздуха котлоагрегата.

Указанные теплоутилизаторы являются основными элементами теплоутилизационных установок, примеры схем которых представлены на рис.1, 2. В этих элементах изменение эксергетических потерь наиболее сильно влияет на изменение эффективности установок в целом.

При проведении исследований принималось во внимание, что теплообменная поверхность водоподогревателя представляет собой пучок оребренных биметаллических труб (стальная основа и алюминиевое оребрение), а воздухоподогревателя – пакет пластин из легированной стали. Температура воды на входе в водоподогреватель изменялась в пределах 5...70 °С. Диапазон изменения входной температуры воздуха принимался равным 20...10 °С. При этом влагосодержание дымовых газов на входе и выходе теплоутилизаторов изменялось в пределах $W_{вх}^{дг} = 0,09...0,13$ кг/кг с.г. и $W_{вых}^{дг} = 0,04...0,09$

кг/кг с.г., а влагосодержание воздуха принималось постоянным. Расчеты выполнялись при 100 % нагрузке котла и температуре его отходящих газов близкой к 160 °С. Пределы изменения чисел $Re^{дг}/Re^{вод}$ и $Re^{дг}/Re^{возд}$ составляли 0,80...1,20.

В качестве целевых функций оптимизации указанных элементов теплоутилизационных установок использовались тепло-эксергетический и эксерго-технологический критерии эффективности: $\varepsilon = E_{пот}^{внут} / Q$, $k_{ex}^r = E_{пот}^{внут} \cdot m / Q^2$. Для определения функциональных зависимостей целевых функций оптимизации от параметров объектов использовались статистические методы планирования эксперимента, которые позволяют искать указанные зависимости (уравнения регрессии) в виде квадратичного полинома [5]:

$$f(x_1...x_n) = a_0 + \sum_{k=1}^n a_k x_k + \sum_{\substack{i,k=1 \\ i \neq k}}^n a_{ik} x_i x_k + \sum_{k=1}^n a_{kk} x_k^2. \quad (1)$$

Расчет соответствующих значений критериев эффективности, которые служили целевыми функциями оптимизации, в пятнадцати точках композиционного плана проводился в соответствии с соотношениями, которые учитывают изменение влагосодержания дымовых газов после прохождения через указанные элементы теплоутилизационной установки.

В качестве примера приведены соотношения для тепло-эксергетического критерия эффективности.

Для водоподогревателя:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 1 / Q \left\{ G^{дг} \left[c_p^{дг} (T_{вх}^{дг} - T_{вых}^{дг}) - T_0 \left(c_p^{дг} \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_{вых}^{дг}} - \frac{R}{\mu^{дг}} \ln \frac{p_{вх}^{дг} - p_{s_{вх}} \varphi_{вх}^{дг}}{p_{вых}^{дг} - p_{s_{вых}} \varphi_{вых}^{дг}} \right) \right] - \right. \\ & - G^{дг} W_{вых}^{дг} \left[c_p^n (T_{вых}^{дг} - T_0) - T_0 \left(c_p^n \ln \frac{T_{вых}^{дг}}{T_0} - \frac{R}{\mu^n} \ln \frac{\rho_{вых}^n p_{s_{вых}} v_{вых}'' W_{вых}}{\rho_0^n p_{s_0} v_0'' \varphi_0 (1 + W_{вых})} \right) \right] + \\ & + G^{дг} W_{вх}^{дг} \left[c_p^n (T_{вх}^{дг} - T_0) - T_0 \left(c_p^n \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_0} - \frac{R}{\mu^n} \ln \frac{\rho_{вх}^n p_{s_{вх}} v_{вх}'' W_{вх}}{\rho_0^n p_{s_0} v_0'' \varphi_0 (1 + W_{вх})} \right) \right] - \\ & \left. - G^{вод} \left[(i_{вых}^{вод} - i_{вх}^{вод}) - T_0 (s_{вых}^{вод} - s_{вх}^{вод}) \right] \right\}. \quad (2) \end{aligned}$$

Для воздухоподогревателя:

$$\varepsilon = 1 / Q \left\{ G^{дг} \left[c_p^{дг} (T_{вх}^{дг} - T_{вых}^{дг}) - T_0 \left(c_p^{дг} \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_{вых}^{дг}} - \frac{R}{\mu^{дг}} \ln \frac{p_{вх}^{дг} - p_{s_{вх}} \varphi_{вх}^{дг}}{p_{вых}^{дг} - p_{s_{вых}} \varphi_{вых}^{дг}} \right) \right] - \right.$$

$$\begin{aligned}
 & -G^{дг} W_{вх}^{дг} \left[c_p^n (T_{вх}^{дг} - T_0) - T_0 \left(c_p^n \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_0} - \frac{R}{\mu^n} \ln \frac{\rho_{вх}^n p_{с_{вх}} v_{вх}'' W_{вх}}{\rho_0^n p_{с_0} v_0'' \varphi_0 (1 + W_{вх})} \right) \right] + \\
 & + G^{дг} W_{вх}^{дг} \left[c_p^n (T_{вх}^{дг} - T_0) - T_0 \left(c_p^n \ln \frac{T_{вх}^{дг}}{T_0} - \frac{R}{\mu^n} \ln \frac{\rho_{вх}^n p_{с_{вх}} v_{вх}'' W_{вх}}{\rho_0^n p_{с_0} v_0'' \varphi_0 (1 + W_{вх})} \right) \right] - \\
 & - G^{вoз} \left[c_p^{вoз} (T_{вх}^{вoз} - T_{вх}^{вoз}) - T_0 \left(c_p^{вoз} \ln \frac{T_{вх}^{вoз}}{T_{вх}^{вoз}} - \frac{R}{\mu^{вoз}} \ln \frac{p_{вх}^{вoз}}{p_{вх}^{вoз}} \right) \right] \}. \tag{3}
 \end{aligned}$$

Полученные с помощью методов планирования эксперимента и соотношений (1)-(3) функциональные зависимости критериев эффективности от некоторых режимных параметров водоподогревателя и воздухоподогревателя позволяют исследовать закономерности влияния этих параметров на эксергетическую эффективность теплоутилизаторов и оптимизировать эти параметры. Такими параметрами в данной работе были начальное $W_{вх}^{дг}$ и конечное $W_{вх}^{дг}$ влагосодержания дымовых газов, а также отношения чисел Рейнольдса теплоносителей $Re^{дг}/Re^{вод}$ и $Re^{дг}/Re^{возд}$. В качестве примера приведена полученная для воздухоподогревателя зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от указанных параметров, на основании которой определялись их оптимальные значения:

$$\begin{aligned}
 k_{ex}^r = & 3,52 - 44,81 W_{вх}^{дг} + 179,32 W_{вх}^{дг\ 2} + 1,79 W_{вх}^{дг} - \\
 & - 145,01 W_{вх}^{дг} W_{вх}^{дг} + 205,73 W_{вх}^{дг\ 2} - 0,90 Re^{дг}/Re^{вод} + \\
 & + 5,85 W_{вх}^{дг} Re^{дг}/Re^{возд} - 1,22 W_{вх}^{дг} Re^{дг}/Re^{возд} + \\
 & + 0,08 Re^{дг}/Re^{возд\ 2}.
 \end{aligned}$$

Результаты проведенных исследований представлены на рисунках 3-8. Как видно из графиков на рисунках 3-5, для водоподогревателя значения тепло-эксергетического критерия эффективности в заданных интервалах значений начального влагосодержания дымовых газов и отношения чисел Рейнольдса дымовых газов и воды имеют минимум при $W_{вх}^{дг} = 0,13$ кг/кг с.г. и $Re^{дг}/Re^{вод} = 0,94$. Для конечного

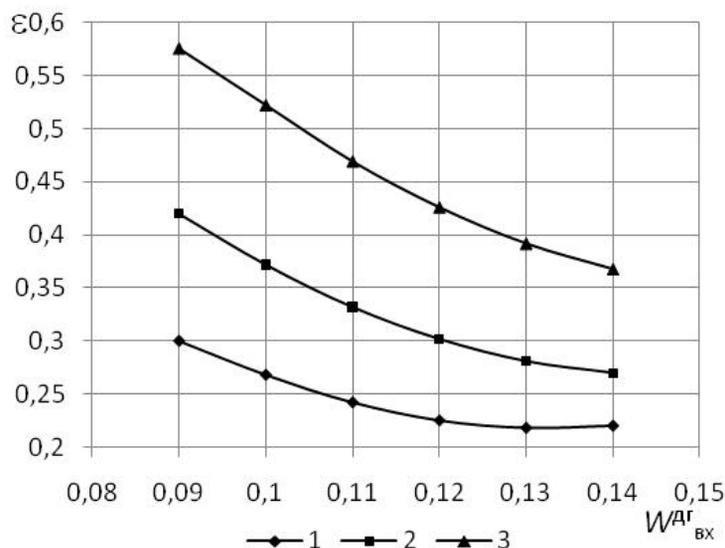


Рис. 3. Зависимость тепло-эксергетического критерия эффективности от начального влагосодержания дымовых газов для водоподогревателя при $Re^{дг}/Re^{вод} = 0,94$: 1 - $W_{вх}^{дг} = 0,04$ кг/кг с.г.; 2 - 0,06; 3 - 0,08.

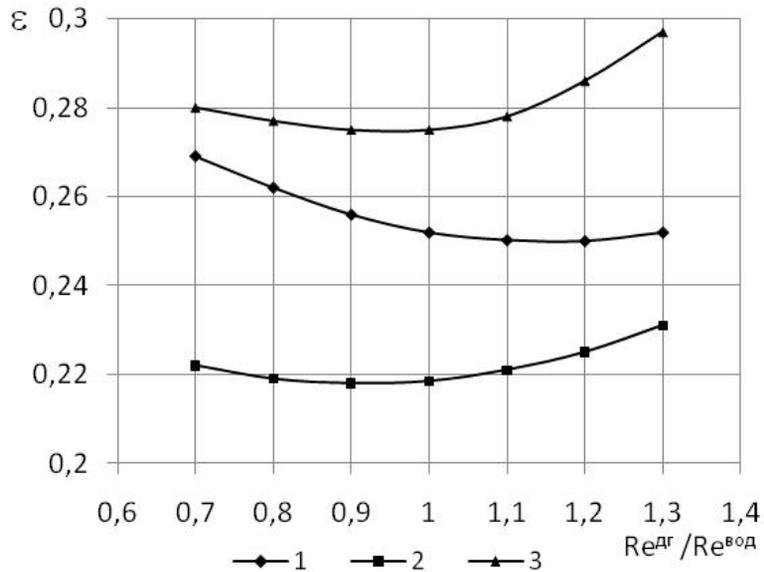


Рис. 4. Зависимость тепло-энергетического критерия эффективности от отношения чисел Рейнольдса дымовых газов и воды для водоподогревателя при $W_{\text{ВЫХ}}^{dg} = 0,04$ кг/кг с.г.: 1 – $W_{\text{ВХ}}^{dg} = 0,16$ кг/кг с.г.; 2 – 0,13; 3 – 0,10.

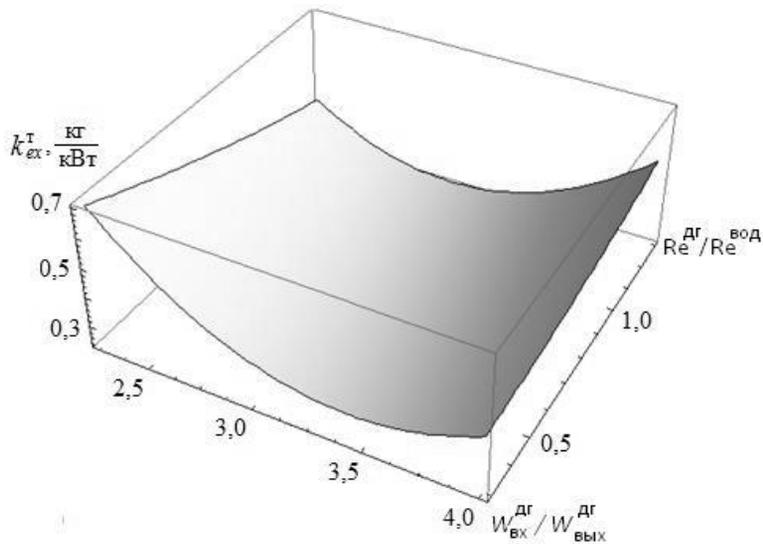


Рис. 5. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от отношения начального и конечного влагосодержания дымовых газов и отношения чисел Рейнольдса теплоносителей для водоподогревателя при $W_{\text{ВЫХ}}^{dg} = 0,04$ кг/кг с.г.

влагосодержаия наименьшее значение тепло-энергетического критерия соответствует нижней границе интервала значений влагосодержания при $W_{\text{ВЫХ}}^{dg} = 0,04$ кг/кг с.г. Указанные оптимальные значения параметров обеспечивают максимальную эффективность водоподогревателя.

При использовании в качестве целевой функции оптимизации эксерго-технологиче-

ского критерия эффективности оптимальные значения начального и конечного влагосодержания остаются такими же, как и в предыдущем случае, а оптимальное значение $Re^{dg} / Re^{вод}$ смещается в сторону больших значений и составляет $(Re^{dg} / Re^{вод})_{\text{опт}} = 1,20$. Это обусловлено тем, что эксерго-технологический критерий включает показатель удельной металлоемкости

m/Q , который уменьшается более значительно с увеличением Q и соответственно с ростом $Re^{дг}/Re^{вод}$.

Результаты исследований эксергетической эффективности воздухоподогревателя показали, что при использовании в качестве целевых функций как тепло-эксергетического, так и эксерго-технологического критериев эффективности, минимум значений критериев эффективности, т.е. максимальная эксергетическая эффектив-

ность, наблюдается при $W_{вых}^{дг} = 0,04$ кг/кг с.г.

Для рассмотренной ситуации в случае больших значений отношения чисел $Re^{дг}/Re^{возд}$ максимальная эффективность воздухоподогревателя достигается при небольших величинах начального влагосодержания $W_{вх}^{дг}$, что объясняется преобладающим возрастанием теплопроизводительности воздухоподогревателя Q за счет относительного увеличения скорости дымовых газов.

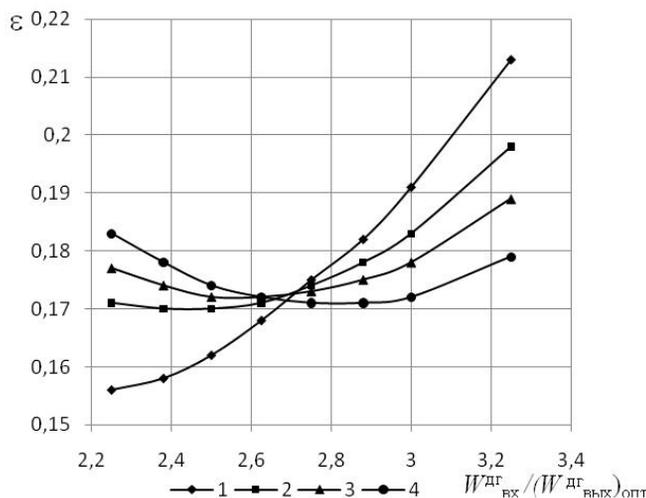


Рис. 6. Зависимость тепло-эксергетического критерия эффективности от отношения начального и конечного влагосодержания для воздухоподогревателя при $(W_{вых}^{дг})_{опт} = 0,04$ кг/кг с.г.; 1 – $Re^{дг}/Re^{возд} = 1,20$; 2 – $1,00$; 3 – $0,90$; 4 – $0,80$.

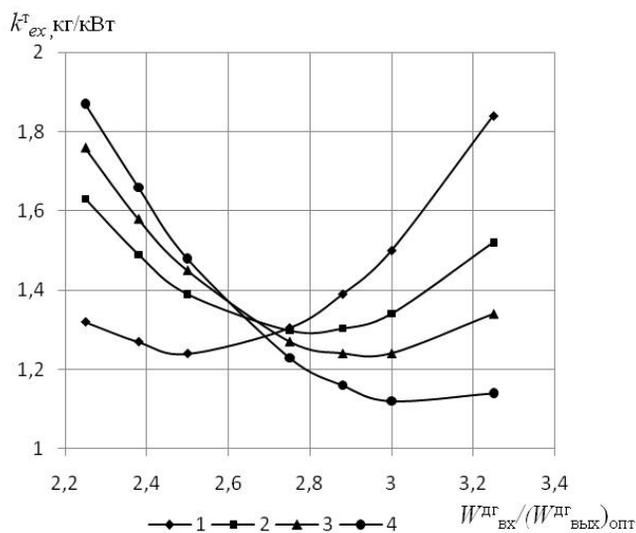


Рис. 7. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от отношения начального и конечного влагосодержания для воздухоподогревателя при $(W_{вых}^{дг})_{опт} = 0,04$ кг/кг с.г.; 1 – $Re^{дг}/Re^{возд} = 1,20$; 2 – $1,00$; 3 – $0,90$; 4 – $0,80$.

В случае же уменьшения значения $Re^{дг}/Re^{вод}$ минимумы эксергетических критериев ε и k_{ex}^T сдвигаются в сторону возрастания величины $W_{вх}^{дг}$, при

этом увеличение Q происходит преимущественно за счет увеличения разности влажностей на входе и выходе воздухоподогревателя.

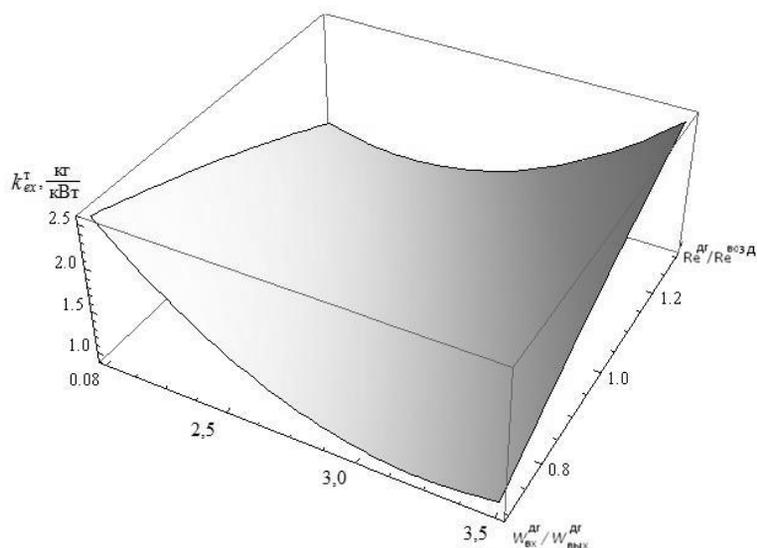


Рис. 8. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от отношения начального и конечного влажностей дымовых газов и отношения чисел Рейнольдса теплоносителей для воздухоподогревателя при $(W_{вых}^{дг})_{опт} = 0,04$ кг/кг с.г.

Результаты оптимизации водо-и воздухогрейного теплоутилизаторов представлены в таблицах 1, 2.

Табл. 1. Оптимальные параметры водогрейного теплоутилизатора

Целевая функция	Водоподогреватель			
	$W_{вх}^{дг}$	$W_{вых}^{дг}$	$Re^{дг}/Re^{вод}$	Оптимальные значения критерия эффективности
ε	0,13	0,04	0,94	0,218
k_{ex}^T	0,13	0,04	1,20	0,25

Табл. 2. Оптимальные параметры воздухогрейного теплоутилизатора

Целевая функция	Воздухоподогреватель							
	Интервал изменения $W_{вх}^{дг} / W_{вых}^{дг}$							
	2,25...2,75				2,75...3,25			
	$W_{вх}^{дг}$	$W_{вых}^{дг}$	$Re^{дг}/Re^{вод}$	Опт.знач. критерия	$W_{вх}^{дг}$	$W_{вых}^{дг}$	$Re^{дг}/Re^{вод}$	Опт.знач. критерия
ε	0,09	0,04	1,20	0,156	0,12	0,04	0,80	0,171
k_{ex}^T	0,10	0,04	1,20	1,24	0,12	0,04	0,80	1,12

Сравнительный анализ эффективности оптимизированных теплоутилизаторов показал, что термодинамическая эффективность, которая характеризуется тепло-эксергетическим критерием ε , выше для воздухоподогревателя, тогда как эксергетическая эффективность, характеризующаяся эксерго-технологическим критерием k_{ex}^T , который учитывает теплотехнические и технологические параметры воздухоподогревателя, выше для водоподогревателя.

Выводы

1. Проведены оптимизация и анализ эффективности конденсационных теплоутилизаторов: водоподогревателя и воздухоподогревателя, предназначенных для подогрева воды и дутьевого воздуха котлоагрегата.

2. С помощью методов планирования эксперимента получены функциональные зависимости, позволяющие исследовать закономерности влияния некоторых режимных параметров исследуемых теплоутилизаторов на их эксергетическую эффективность и определить оптимальные значения этих параметров.

3. Установлены закономерности влияния начального и конечного влагосодержания дымовых газов и отношения чисел Рейнольдса теплоносителей на эксергетическую эффективность теплоутилизаторов.

4. Получены оптимальные значения режимных параметров теплоутилизаторов,

которые позволяют увеличить их эффективность до 2,5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Эксергетический* расчет технических систем. Справочное пособие. Под ред. Долинского А.А.: Наукова Думка. – 1991. – 360 с.

2. *Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шеренковский Ю.В.* Эффективность теплоутилизационной установки для котельных, оптимизированной различными методами. // *Промышленная теплотехника.* – 2014. – Т. 36, №1. – С. 41-47.

3. *Бойко А.В., Говорущенко Ю.Р., Усатый А.П., Руденко А.С.* Методика и алгоритм оптимизации проточных частей осевых турбин с учетом режимов эксплуатации. // *Тяжелое машиностроение.* – 2009, №9. – С. 11-15.

4. *Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Степанова А.И., Пресич Г.А., Шеренковский Ю.В., Гнедаш Г.А.* Анализ эффективности теплоутилизационной установки для нагревания и увлажнения дутьевого воздуха котлоагрегата // *Промышленная теплотехника.* – 2015. – Т.37, № 4. – С.71-79.

5. *Налимов В.В.* Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 207 с.

6. *Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Новаковский М.А.* Эксерго-технологическая эффективность газовоздушных теплоутилизаторов энергетических установок. // *Промышленная теплотехника.* – 2011. – Т. 33, №3. – С.42-49.

EFFICIENCY OF ELEMENTS OF COMBINED HEATUTILISATION SYSTEM FOR HEATING OF WATER AND COMBUSTION AIR

Fialko N., Navrodska R., Stepanova A., Gnedash G.

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

There are exposed results of analysis for efficiency and optimization of structural and working parameters of some elements contained in combined thermoutilizing device used for heating of of water and blast air without of moistening. The solution of general problem obtained by the method of multilevel optimization is presented. It takes into account the change of content the smoke gases and air.

References 6, tables 2, figures 8.

Key words: thermoutilizers, optimizing, exergetic analysis, criteria of efficiency.

1. *Exergy* calculation of technical systems.

Reference book. Edited by Dolinsky A. Kyiv: "Naukova dumka". – 1991. – 360 p.

2. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Sherenkovsky J.* Efficiency for thermoutilizing systems of boiler plants, for optimization of method of different types // *Promyshlennaya teplotekhnika.* – 2014. – V. 36 , № 1. – P. 41-47. (Rus.).

3. *Boiko A., Govorutchenko J., Usatu A., Rudenko A.* Methodology and alhorithm of optimithation of turbine setting with taking into account the condition of use // *Tiageloe maghinostroenie.* – 2009, №9. – P. 11-15. (Rus.).

4. *Fialko N., Navrodska R., Stepanova A., Presich G., Sherenkovsky J., Gnedash G.* The efficiency analsis of heat utilization instalasion for heating and humidifying of combustion air of boiler plant // *Promyshlennaya teplotekhnika.* 2015. – V.37, №4. – P. 71-79. (Rus.).

5. *Nalimov V.* Theory of experiment. – M.: Nauka, 1971. – 207 p.

6. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Sherenkovsky J.* Exergy and technological efficiency of gas-air heat recovery units of power plants // *Promyshlennaya teplotekhnika.* – 2011. – V.33, № 3. – P.42-49. (Rus.)

Получено 18.03.2015

Received 18.03.2015

УДК 536(075.8)

ПОЛЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ

Драганов Б.Х., доктор технических наук

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, ул. Г. Обороны, 15, Киев, 03041, Украина

Наведено метод фотометричного опису листка і радіаційного режиму рослин у тіньовій і сонячній областях. Досліджено виробництво ентропії в процесі фотосинтезу, ієрархічність самоорганізації систем.

Приведен метод фотометрического описания листа и радиационного режима растений в теневой и солнечной областях. Исследованы производство энтропии в процессе фотосинтеза, иерархичность самоорганизации систем.

Shows a method for photometric description of leaf and the radiation regime plants in shady and sunny areas. Studied entropy production in photosynthesis, hierarchical self-organizing systems.

Растительный покров представляет собой совокупность неоднородных и изменяющихся во времени частей, поэтому фотометрический анализ должен опираться на математико-статистический метод. Отметим ряд работ, посвященных фотометрии.

Кинрсон и Фрич [1] использовали метод статистической выборки для исследования характеристики хвойных лесов. В модели Саэки и Куройва [2] учитывается влияние части растений на функцию распределения листовой поверхности по высоте растения.

В методе Удагавы [3] вертикальное описание листовой поверхности в почве кукурузы определяется при помощи функции, имеющей вид кубической параболы. В работах [4, 5] выполнен анализ структуры распределения листьев по высоте стебля. На основе этих исследований получены соответствующие расчетные зависимости.

Радиационный режим растительного покрова (РП) формируется вследствие ряда факторов: интенсивности лучистой энергии солнечной радиации; воздействия лучистой энергии на биологические процессы в растении; расположения элементов растений, их геометрических и оптических свойств. При моделировании радиационного поля следует принять во внимание:

- архитектура растительного покрова многообразна и изменяется в широких пределах. Элементы фитомассы имеют сложную фигуру, расположены своеобразно (не подчиняющие-

ся определенному геометрическому порядку и, вместе с тем, структуру нельзя считать хаотичной) и это затрудняет их математическое описание;

- на верхнюю границу РП падает как прямая, так и диффузионная радиация Солнца;

- для зеленой растительности характерен большой коэффициент поглощения в области фотосинтетической активной радиации (ФАР) и малый в области близкой к инфракрасной радиации (БИКР). Вследствие этого в формировании режима ФАР в РП первостепенное значение имеет архитектура растительного покрова – форма и размеры фитоэлементов, их размещение и ориентация, расположение растений в РП и т.д.

Методы математического моделирования режима радиационного покрова приведены в [6, 7]. В этих работах элементы растительности рассматриваются как поглощающие и рассеивающие частицы с заданными геометрическими и оптическими свойствами. Используется модель анизотропной среды, которая в достаточной степени точно отражает физическую картину РП.

При анализе радиационного поля в РП следует принимать во внимание все составляющие радиационного потока: прямого, рассеянного и отраженного.

Плотность потока прямой солнечной радиации в растительном покрове может изменяться в значительных пределах. В солнечных бликах она близка к полному значению S_0 над РП, а в области тени может быть принята равной нулю. Если

в первом приближении пренебречь полутенями, то можно рассматривать Солнце как точечный источник и анализируемый процесс может быть записан при помощи дельта-функции Дирака. В статистическом рассмотрении прямая солнечная радиация записывается в виде случайной функции $X_s(x)$, имеющей только два значения

$$X_s(x) = \begin{cases} 0, & \text{в теневой области;} \\ S_0(r_s), & \text{в солнечных бликах.} \end{cases} \quad (1)$$

Интенсивность рассеянной радиации зависит от высоты Солнца и количества рассеивающих элементов в атмосфере. Важной характеристикой рассеянной радиации, кроме спектрального состава, является ее угловое распределение, определяемое формой индикатрисы рассеяния и оптической толщиной атмосферы.

Среди оптических характеристик РП одной из наиболее существенных является альbedo [8]. Альbedo – величина, характеризующая способность поверхности какого-либо тела отражать (рассеивать) падающее на него излучение. Наряду с интегральным альbedo для всего потока излучения различают также альbedo монохроматическое и альbedo в различных областях спектра (ИК, видимое, УФ).

Небольшие изменения оптических свойств фитоэлементов в области БИКР могут вызвать заметные изменения альbedo РП в этой области спектра. В области ФАР альbedo густого РП небольшое (в пределах 0,03...0,07), в области ВИКР альbedo равно 0,4...0,5 и в области КВР – 0,23...0,27.

В области ФАР зависимость альbedo от ориентации листьев незначительна и ею можно пренебречь. В области БИКР и КНР влияние ориентации листьев существенно при больших и малых высотах Солнца альbedo практически не зависит от ориентации листьев.

На основе разработанной математической модели расчетом получены графики, выражающие зависимости показателей фотосинтеза от определяющих параметров в случае строгой согласованности спектра фотоактивности со спектром воздействующего света. Для квазимонохроматического излучения этому требованию отвечают системы с узкополосным поглощением.

При математическом моделировании радиа-

ционного поля в растительном покрове следует принимать во внимание следующие факторы:

- закономерность размещения растений на подстилающей поверхности и неоднородность размещения фитоэлементов в пределах объема растения;
- учет полутени, во многом обуславливающей неоднородность радиационного поля в растении;
- изменчивость во времени радиационного поля внутри РП.

Заслуживают внимания исследования, посвященные термодинамическому анализу эндоэргических процессов, которые позволили установить условия их эффективности по величине производства энтропии [10]. В настоящее время наиболее обоснованная концепция анализа биологических процессов основывается на подходе Пригожина [11].

Результаты исследований дают основание утверждать, что производство энтропии изменяется линейно от воздействующего параметра. В данном случае имеется ввиду поглощенная мощность излучения, а более точно, спектральная плотность поглощаемой мощности:

$$S_e + S_i = W_e / T, \quad (2)$$

где S_i – производство энтропии эндоэнергетических процессов, происходящих как в живых организмах, так и в технических устройствах; S_e – производство энтропии окружающей среды; W_e – мощность поглощенного излучения; T – температура.

Параметр S_i/S_e может служить характеристикой с целью совершенства процесса фотосинтеза.

Несомненный интерес представляет концепция, что обязательной особенностью синтеза генетической информации является иерархичность. Новый k -й уровень синтеза информации возникает на основе учета свойств элементов предыдущего уровня иерархии [10,12].

Иерархический ряд для энтропий как мера информации записывается в виде:

$$S_n = S_0 + S_{1|0} + S_{2|0,1} + \dots + S_{k|0,1,2,\dots,(k-1)} \quad (3)$$

где члены $S_{k|0,1,2,\dots,(k-1)}$ определяются на основе условных вероятностей, учитывающих синтез информации, относящейся к предыдущим ступеням иерархии.

Развитие в природе происходит на основе иерархии цепочки: случайность-условия-запоминание. Синонимом запоминания в природе служит устойчивость ее объектов и процессов. В результате происходит непрерывное развитие, в процессе которого энтропия растет, но иерархическими ступенями [13].

Случайности, приводящие к детерминизму, и есть главная причина реальности множественности жизни. Иерархичность самоорганизации систем означает, что сам хаос, само существование энтропии есть основа детерминизации запоминаемого объекта, т.е. синтезированной в нем информации.

Заключение

Эффективный метод анализа поля радиации солнечной энергии в покрове растений основывается на концепции термодинамики биологических процессов. Иерархичность самоорганизации систем означает, что значение производства энтропии служит характеристикой необратимости в живых средах. Иерархичность самоорганизации служит основой самоорганизации систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kinerson R., Fritshen L.J.* Modeling a coniferous forest canopy. // *Agric. Meteorol*, vol. 8, No. 6, 1971, P. 439-445.
2. *Saeki T., Kuroiwa S.* On the establishment of the vertical distribution of photosynthetic system in plant community // *Botanical Magazine (Tokyo)*, 1959, vol. 72, № 848. P. 27-35.
3. *Udagawa T. et. al.* Canopy structure of corn plant // *Photosynthesis and Utilization of Solar Energy. Level III.* 1968, P. 20-24.
4. *Horie T.* Vertical distribution of photosynthesis and Utilization of Solar Energy. Level III, 1970, P. 9-15.
5. *Росс Ю., Росс В.* Вертикальное распределение листовой поверхности в посевах. – В кн.: «Фотосинтетическая продуктивность растительного покрова». – Тартару, 1969. – С. 44-59.
6. *Росс Ю.* Математическое моделирование поля фотосинтетически активной радиации (ФАР) в растительном покрове. – В кн.: «Акцинометрия и оптика атмосферы». М.: Наука, 1964. – С. 251-256.
7. *Cowan I.R.* The interception and absorption of radiation in plant stands // *J. of Appl. Ecology*, 1968. – Vol. 5. – P. 367-379.
8. *Шифрин К.С.* К теории альбедо // *Труды ГГО*, 1953. – Вып. 39. - № 101. – С. 244-257.
9. *Warren Wilson J.* Influence of spatial arrangement of foliage area on light interception and pasture growth. – In/: *Proceedings of the 8-th International Grassland Congress*, 1961. – P. 275-279.
10. *Draganov B.H.* Entropy and dynamics of hierarchical systems in the analysis of the evolution of living structures // *Termotechnica.* – 2007. – Anul XI. №1/2 – P. 20-22.
11. *Пригожин И.* Современная термодинамика от тепловых двигателей до диссипативных структур/ И. Пригожин, Д. Канделупи // М.: Мир, 2002, – 461 с.
12. *Долинский А.А.* Энтропия эволюции живых существ // А.А. Долинский, Б.Х. Драганов // *Промышленная теплотехника.* – 2005. – Т. 27 – № 6 – С. 7-9.
13. *Prigogine I.*, 1969. Structure, dissipation and life. – In.: *Theoretical Physics and Biology.* North-Holland Publ. Co., P. 23-52.

Получено 07.05.2015

Received 07.05.2015

УДК 536.423+532.528

ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕЖДУНАРОДНЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УРОВЕНЬ БЕЗОПАСНОСТИ И КАЧЕСТВА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

Коняк А.В., канд. техн. наук

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

У статті приведено аналіз діючих у світі нормативних документів, що регламентують якість і безпеку питної води. Представлено порівняльну таблицю фізико-хімічних, радіологічних, мікробіологічних та органолептичних параметрів води, що містить відомості про гранично допустимі концентрації небезпечних речовин.

Статья содержит анализ действующих нормативных документов, которые регламентируют качество и безопасность питьевой воды. Приведена сравнительная таблица физико-химических, радиологических, микробиологических и органолептических параметров воды, которая содержит информацию о предельно допустимой концентрации опасных веществ.

To the article the analysis of operating in the world normative documents that regulate quality and safety of drinking-water is driven. The comparative table of physical and chemical, radiological, microbiological parameters and taste, smell properties of water that contains information about the maximum possible concentrations of hazardous substances is presented.

Библ. 8, табл. 1.

Ключевые слова: международные нормативные документы, физико-химические и микробиологические параметры, органолептические свойства, вода.

БОЕ – число бляшко-образующих единиц;
ВОЗ – Всемирная Организация Здравоохранения;
ДИВЭ – дискретно-импульсный ввод энергии;
ЕМФ – единица мутности по фармазину;
ЕС – Европейское Сообщество;
СанПиН – санитарные правила и нормы;
ПДК – предельно допустимой концентрации;

ПСП – переносимое суточное потребление;
МАС – максимально допустимая концентрация;
MCLG – максимальный уровень загрязняющих веществ;
MCL – максимально допустимый уровень загрязнения;
USEAP – Агентство по охране окружающей среды Соединенных Штатов Америки.

Важность и роль воды в жизни каждого человека не вызывает сомнений. Значение воды для промышленности переоценить сложно, она используется как технологическое сырьё для обеспечения технологического процесса и как компонент для приготовления получаемого продукта. Основное значение имеют её физико-химические свойства, химический состав, рН, органолептические и микробиологические параметры, температура, проводимость, стабильность воды и другие не менее важные показатели. Но качество и безопасность воды потребляемой человеком не должны негативно влиять на здоровье и состояние организма в целом. Поэтому физико-химичес-

кие, микробиологические, токсикологические и радиационные свойства воды предназначенной для нужд населения и промышленности нормируются согласно документам, которые более подробно будут рассмотрены далее.

Мировое сообщество для обеспечения безопасности воды, предназначенной для потребления населением, использует международные рекомендации Всемирной Организации Здравоохранения «Руководство по контролю качества питьевой воды». Этот документ является основополагающим, на основании рекомендаций которого разрабатываются нормирующие документы других государств. Для стран ЕС эти нормы опре-

деляются директивой Европейского Сообщества – «По качеству питьевой воды, предназначенной для потребления человеком» 98/83/ЕС, на территории США действуют нормы Агентства по охране окружающей среды. Качество воды в пределах Российской Федерации определяет СанПиН 2.1.4.559-96 "Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества". Эти документы призваны обеспечить качество питьевой воды, т.е. её безопасность [1-7], рассмотрим особенности и подходы к решению этого вопроса.

Основная функция Всемирной Организации Здравоохранения (World Health Organization) состоит в решении международных проблем здравоохранения и охраны здоровья населения. В 1984 году этой организацией было издано "Руководство по контролю качества питьевой воды", пересмотренное и дополненное в 1992 году. Рекомендации ВОЗ являются результатом многолетних фундаментальных исследований. Основным критерием оценки качества воды является показатель – переносимого суточного потребления. Данное понятие определяется соотношением количества вещества (поступающее в организм с пищей, водой, и др.) на массу тела человека (мг/кг или мкг/кг), которое может ежедневно потребляться на протяжении жизни без заметного риска для здоровья. В результате исследований установлены значения ПСП по основным потенциально вредным для человека веществам. На основании этих данных с применением сложной системы поправочных коэффициентов были разработаны нормы содержания основных вредных веществ в воде. При определении численных значений рекомендуемых величин для воды учитывалось поступление вещества из всех источников (с пищей, дыханием и т.п.), это гарантирует, что суммарное суточное потребление вещества из всех источников (включая питьевую воду, содержащую концентрацию этого вещества на уровне, равном или близком рекомендованной величине) не превысит переносимого суточного потребления [2,4,5]. Предложение ВОЗ по содержанию загрязняющих веществ в воде приведено как связка параметров: рекомендации ВОЗ по безвредной для человека концентрации веществ

в питьевой воде, допустимое поступление химических веществ в организм человека и сведения о токсичности соединений химических веществ для животных и человека, в таблицу внесены значения рекомендаций, как несущие определяющий характер.

Директива Европейского Сообщества (European Community) 80/778/ЕС была принята Европейским Советом 15 июля 1980 года, известна под названием "Директива по Питьевой Воде" (Drinking Water Directive). Данный документ, касающийся качества воды, предназначенной для потребления населением, стал основанием для законодательства водного хозяйства европейских стран-членов ЕС. В директиве для большинства параметров установлено два уровня предельно допустимой концентрации: уровень G – это долговременная цель, которую странам-членам ЕС желательно достигнуть в перспективе; уровень I – это обязательный для выполнения всеми странами порядок величин, определяющих качество воды.

В Директиве эти нормы закреплены в виде величин МАС (Maximum Admissible Concentration) для каждого параметра. Законодательство стран-членов ЕС должно устанавливать нормы качества воды не выше, чем величина МАС.

С 3 ноября 1998 г. Советом Европейского Союза взамен действовавшей с 1980 г была принята директива "По качеству питьевой воды, предназначенной для потребления человеком" 98/83/ЕС. В новом издании директивы перечень обязательных для контроля параметров сокращен, но предельные значения по многим из них ужесточены. В Директиве ЕС нормируются параметры качества питьевой воды, которые разделены на несколько групп: органолептические показатели, физико-химические параметры, вещества, присутствие которых в воде в больших количествах нежелательно, токсичные вещества, микробиологические показатели и параметры умягченной воды, предназначенной для потребления [1,3]. В директиве 98/83/ЕС в приложении I части А и В содержат химические и микробиологические параметры и параметрические величины носящие обязательный характер, в части С содержатся индикаторные параметры для

мониторинга состояния воды. В сравнительную таблицу внесены значения как обязательные, так и индикаторные величины.

В Соединенных штатах Америки вопросы безопасности и качества воды входит в компетенцию Агентства по охране окружающей среды США (United State Environment Protection Agency). Это правительственное учреждение, в обязанности которого входит защита здоровья населения и охрана окружающей среды. Агентством был разработан федеральный стандарт определяющий качество питьевой воды США, который включает два раздела:

- обязательный для соблюдения, объединяющий на сегодняшний день 79 параметров (органические и неорганические примеси, радионуклиды, микроорганизмы), потенциально опасных для здоровья человека – National Primary Drinking Water Regulations;

- рекомендационный стандарт, включает 15 параметров, превышение нормативов по которым может ухудшить потребительские качества воды – National Secondary Drinking Water Regulations.

С 1986 года по каждому параметру установлены два норматива Maximum Contaminant Level Goal (MCLG) и Maximum Contaminant Level (MCL). MCL – это обязательная для соблюдения величина, представляющая собой предельно допустимый уровень по каждому параметру качества воды. Данная величина устанавливается максимально близко к MCLG с учетом современных технологических возможностей и экономической целесообразности. MCLG – представляет собой тот максимальный уровень, при котором данное вещество (воздействие) гарантированно не оказывает вредного влияния на организм человека. Строгое соблюдение этого уровня не является обязательным, но является желаемым, к которому следует стремиться. По большинству позиций величины MCLG и MCL совпадают, однако у ряда параметров (канцерогены, микробиология, радионуклиды) величина MCLG значительно жестче и, как правило, равна нулю, что означает стремление к достижению полного отсутствия данного вида загрязнений [2,4,6].

На территории Российской Федерации действуют санитарные правила и нормы РФ СанПиН 2.1.4.559-96 "Питьевая вода. Гигиенические

требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества" утвержден постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 24.10.1996 г. и введен в действие с 1 июля 1997 года. Документ разработан на основании данных российских ученых с учетом рекомендаций ВОЗ. СанПиН 2.1.4.559-96 устанавливает гигиенические требования к питьевой воде, нормирует содержание вредных химических веществ, наиболее часто встречающихся в природных водах, а также поступающих в источники водоснабжения в результате хозяйственной деятельности человека, определяет органолептические и некоторые физико-химические параметры питьевой воды.

Отличительной чертой этого документа является наличие, кроме предельно-допустимой концентрации вещества, дополнительных значений показателя вредности и класса опасности. Дополнительно введены понятия показателя вредности и класса безопасности.

Показатель вредности – это лимитирующий признак вредности веществ, по которому установлен норматив. Класс опасности – это показатель, характеризующий степень опасности для человека веществ, загрязняющих питьевую воду. Согласно градации вещества делятся на следующие классы опасности: 1 класс – чрезвычайно опасные; 2 класс – высокоопасные; 3 класс – опасные; 4 класс – умеренно опасные. Учитывать класс опасности загрязняющих веществ крайне важно, так как они могут обладать кумулятивным эффектом. Это означает, что несколько особо вредных веществ, даже если содержание каждого из них не превышает предельно допустимой концентрации, могут в совокупности сделать воду опасной. То есть вода, формально удовлетворяющая нормам по всем отдельным параметрам, в целом может оказаться не пригодной для питья. Поэтому при обнаружении в питьевой воде нескольких химических веществ, относящихся к 1 и 2 классам опасности и нормируемых по санитарно-токсикологическому признаку вредности, определяют сумму отношений фактических концентраций каждого из них к величине его ПДК. Эта сумма не должна превышать 1 [2,3,7].

Вода для потребления населением Украины нормируется «Державними санітарними нор-

мами та правилами «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» ДсанПіН 2.2.4-171-10, а также разработан обобщающий документ ДСТУ «Вода питна. Вимоги та методи контролю якості», который распространяется на воду питьевую централизованного и нецентрализованного водоснабжения. Основу документа составляют 82 действующих нормативных акта, которые регламентируют 80 параметров воды. Параметры условно разделены на 10 групп: микробиологические параметры, вирусологическая безопасность, паразитологические показатели, микологический показатель, уровень токсикологической безопасности, показатели радиационной безопасности, органолептика и химические показатели влияющие на органолептические свойства воды, токсикологические показатели безопасности химического состава (20 – неорганических компонентов, 6 – органических компонентов и 2 интегральные показатели) и вещества, которые образуются в процессе водоподготовки. В разработанном документе учтены рекомендации ВОЗ.

Основной действующий документ, нормирующий химические параметры питьевой воды ДсанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною», регламентирует определение ряда важнейших параметров, а также нормирует показатели: микробиологической безопасности, паразитологической безопасности, органолептические показатели, физико-химические характеристики, санитарно-токсикологические показатели [5]. Значения этих параметров приведены в сравнительной таблице 1 в соответствующей графе. Необходимо отметить, что по большинству параметров ДсанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною», удовлетворяет рекомендациям ВОЗ. В сравнительной таблице 1 приведены ключевые параметры, определяющие безопасность и качество воды действующих нормирующих документов.

Необходимо отметить, что в зависимости от комплексности проблем присущих водным ре-

сурсам определённого континентального региона рассматриваются соответствующие параметры безопасности воды. Так, например, для стран Евросоюза, где ресурсы внутренних бассейнов весьма ограничены, но развита промышленность, особое внимание требуют параметры органических показателей и микробиологии. Проблемы экологического характера водных ресурсов Украины и Российской Федерации нашли отображение в расширенном спектре радиологических параметров и показателей органической химии.

В Институте технической теплофизики НАН Украины в рамках научного направления дискретно-импульсного ввода энергии проведены исследования влияния механизмов ДИВЭ на физико-химические и микробиологические показатели воды и водных систем [8]. Основные механизмы ДИВЭ, которые использовались в исследованиях – это эффекты, связанные с ускорением движения непрерывной фазы; кавитационные механизмы вызванные мгновенным сбросом давления $\frac{dP}{dt} = 1,5 \frac{\Gamma \text{Па}}{c}$; адиабатическое закипание; коллективные эффекты в ансамбле пузырей; турбулизация межфазной поверхности паро-жидкости пузырьковых сред. Установлено, что в результате обработки происходит снижение: общей жёсткости до 35,2 %; общей щёлочности до 27,4 %; окисление перманганата до 35,5 %; количества сухого остатка до 12,4; массовой концентрации железа до 37,5 %; фтора до 21 %; аммиака и ионов аммония до 60 %. Происходит повышение водородного показателя до 20 %, наблюдается снижение электропроводности до 14,6 %. Также отмечается улучшение микробиологических параметров по показателям общего микробного числа и индекса группы бактерий кишечной палочки. Результаты экспериментальных исследований (таблица 1) были сопоставлены с соответствующими показателями нормирующих документов, а именно с ДсанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною», и установлено их согласование по основным физико-химическим и микробиологическим показателям.

Таблица 1. Основные параметры определяющие уровень безопасности и качества воды.

1	2	3	4	5	6	7	8
Параметры	Единицы измерения	Рекомендации ВОЗ	Директива ЕС, 98/83/E	USEPA	СанПиН 2.1.4.559-96	ДСанПиН 2.2.4-171-10	Вода обра- бот. ДИВЭ
Общие физико-химические показатели							
Водородный показатель	ед. рН	6,5-8,5	6,5-9,5	6,5-8,5	6-9	6,5-8,5	7,9
Общая минерализация	мг/дм ³	1000		500	1000	1000	260
Жесткость общая	мг/дм ³	500 по СаСО ₃			7	7	2,2
Окисляемость перманганата	мг O ₂ /дм ³		5		5	5	0,72
Нефтепродукты	мг/дм ³				0,1	0,1	
Неорганические вещества	мг/дм ³						
Алюминий (Al ³⁺)	мг/дм ³	0,2	0,2	0,2	0,5	0,2	
Аммоний	мг/дм ³		50			0,5	
Барий (Ba ²⁺)	мг/дм ³			2	0,1		
Бериллий (Be ²⁺)	мг/дм ³			0,004	0,0002	0,0002	
Бор (В)	мг/дм ³		10	-	0,5	0,5	
Железо (Fe)	мг/дм ³	0,3	0,2	0,3	0,3 (Σ 1,0)	0,2	0,1
Кадмий (Cd)	мг/дм ³	0,005	0,005	0,005	0,001	0,001	
Кобальт (Co)	мг/дм ³				0,1	0,1	
Кремний (Si)	мг/дм ³			-	10	10	
Марганец (Mn)	мг/дм ³	0,1	0,05	0,05	0,1 (Σ 0,5)	0,05	
Медь (Cu)	мг/дм ³	1	2 (мг/ч)	1,0...1,3	1,0	1	
Молибден (Mo)	мг/дм ³			-	0,25	0,07	
Мышьяк (As)	мг/дм ³		0,01	0,05	0,05	0,01	
Натрий (Na ⁺)	мг/дм ³	200	200	-	-	200	99
Никель (Ni)	мг/дм ³	-	0,02	-	0,1	0,02	
Нитраты (поNO ³⁻)	мг/дм ³	10	50	44	45	50	0,1
Нитриты (поNO ²⁻)	мг/дм ³	1	0,5	3,5	3,0	0,5	0,002
Пестициды	мг/дм ³		0,0001			0,0001	
Пестициды общ. содержание	мг/дм ³		0,0005			0,0005	
Ртуть (Hg)	мг/дм ³	0,001	0,001	0,002	0,0005	0,0005	
Свинец (Pb)	мг/дм ³	0,05	0,01	0,015	0,03	0,01	

1	2	3	4	5	6	7	8
Селен (Se)	мг/дм ³	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	
Серебро (Ag ⁺)	мг/дм ³	в реком- дации нет необходимости		0,1	0,05	не определяется	
Стронций (Sr ²⁺)	мг/дм ³			-	7,0	7,0	
Сульфаты (SO ₄ ²⁻)	мг/дм ³	400	250	250	500	250	10
Сурьма	мг/дм ³		0,005			0,005	
Фтор (F)	мг/дм ³	1,5		4			0,5
Фториды (F) для климат. зон:	мг/дм ³		1,5	I и II: 2,0÷4,0	I и II: 1,5; III-1,2	II: 1,5; III: 1,2; V: 0,7	
Хлориды (Cl ⁻)	мг/дм ³	250	250	250	350	250	17
Хром (Cr ²⁺) и (Cr ⁶⁺), общий	мг/дм ³	0,05	0,05	0,1	0,5 и 0,05	0,05	
Цианиды (CN ⁻)	мг/дм ³	0,1	0,05	0,2	0,035	0,05	
Цинк (Zn ²⁺)	мг/дм ³	5		5	5	1	
Органические вещества							
Бенз(а)пирен	мг/дм ³		0,0001			0,000005	
Бензол	мг/дм ³	0,01	0,001			0,001	
1,2-дихлорэтан	мг/дм ³	0,01	0,003			0,003	
Общий органич. углерод	мг/дм ³		без аном. изменен.			8	
ПАВ	мг/дм ³	0,2		0,5	0,5	0,5	
Тетрахлорэтилен	мг/дм ³	0,01	0,01			0,01	
Тригалометаны	мг/кг		0,1			0,1	
Фенолы и хлорфенолы	мг/дм ³	0,0001				0,001 и 0,0003	
Хлороформ	мг/дм ³	0,03				0,06	
Микробиологические и паразитологические показатели воды							
Термотолерантные колиф. бакт.	Ч. б. в 100 мл	0	0	0	0		
Общие колиформные бактерии	Ч. б. в 100 мл	0	0 (при 20°C)	5 %	0	0	
Общее микробное число	Чис. колонии бакт. в 1мл		100 (при 22°C); 20 (при 37°C)	500	50	100(при 37°C-24ч) 0 (при 22°C-72 ч);	69(при 37°C-24ч)
Колифаги	БОЕ в 100 мл				0	0	
Споры сульфореduc. клубридий	Ч. с в 20 мл		0		0		
Цисты лямблий	Ч. ц. в 50 мл			0	0		

1	2	3	4	5	6	7	8
Кишечная палочка (e-coli)	КОЕ/100см ²		0			0	
Органолептические свойства воды							
Запах	баллы		приемлемый для потребителей без аномальных изменений		2	2 (при 20°С и 60°С)	0
Привкус	баллы				2	2	1
Цветность	градусы	15		15	20	20	1,6
Мутность, ЕМФ (мг/дм ³ каолин)	(мг/дм ³ каолин)	5		0,5...1	2,6 (1,5 каолин)	1	0,25
Радиационная безопасность питьевой воды							
Σ α-радиоактивность	Бк/дм ³	0,1			0,1	0,1	
Σ β-радиоактивность	Бк/дм ³	1			1,0	1,0	
Σ активность смеси изотопов U	Бк/дм ³					1	
Тритий	Бк/дм ³		100				
Общая индикационная доза	мСв/год		0,1				

Примечание:

Графа 3 содержит предложение ВОЗ по содержанию загрязняющих веществ в воде, в таблицу внесены значения рекомендаций несущих определяющий характер.

Графа 4 содержит значения как обязательные, так и индикаторные величины директивы 98/83/ЕС от 3 ноября 1998г.

В графу 5 внесены значения максимально допустимого уровня загрязнения MCL USEPA.

Графа 6 содержит значения норматива предельно допустимой концентрации вещества согласно РФ СанПиН 2.1.4.559-96 от 24.10.1996 г.

В графе 7 приведены допустимые нормативные значения концентрации вредных веществ для водопроводной и пунктов розлива и бюветных вод согласно ДсанПиН 2.2.4-171-10.

Графа 8 содержит результаты экспериментальных исследований влияния механизмов ДИВЭ, а именно параметры обработанной артезианской воды киевского региона.

Выводы

По результатам анализа действующих нормативных документов, которые регламентируют безопасность и качество воды предназначенной для потребления населением следует отметить комплексность и обобщённость подходов к решению поставленных задач. Рассмотренные нормирующие документы независимо от подхода к определению допустимого уровня концентрации вредных веществ, согласуются между собой и условно объединяются в несколько групп: общие показатели, неорганические и органические вещества, микробиологические и паразитологические показатели, органолептические свойства и радиационная безопасность. Проверка основных параметров воды обработанной методом дискретно-импульсного ввода энергии показала соответствие действующим нормативным документам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Директива 98/83/ЕС Совета от 3 ноября 1998 года, о качестве воды, предназначенной для употребления людьми / <http://old.aquaexpert.ru/analytics/?id=21&t=2>
2. Нормы качества питьевой воды. ГОСТ 2874-82 (отменен), СанПиН 2.1.4.10749-01 "Питьевая вода. Гигиенические требования

к качеству воды.", ЕС – директива 98/83/ЕС "По качеству питьевой воды, предназначенной для потребления человеком", международные рекомендации ВОЗ "Руководство по контролю качества питьевой воды 1992 г.", нормы Агентства по охране окружающей среды США <http://www.dpva.info/Guide/GuideTechnologyDrawings/WaterSupplyWasteWater/DrinkingWater/DrinkWater>

3. Рябчиков Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования / Рябчиков Б.Е. - М.: ДеЛи принт, 2004. – 328 с.

4. Качество воды. Стандарты и нормы <http://akvant.com.ua/st/10.php>

5. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10). С. 47

6. Качество воды <http://talavoda.kiev.ua/quality-awards.html>

7. Государственный стандарт на питьевую воду. <http://voda-resurs.ru/?p=150>

8. Сланік А.В. Використання механізмів дискретно-імпульсного введення енергії для обробки води. Дис. на здобуття ступ. к.т.н. – 190 с.

**REVIEW AND ANALYSIS OF
INTERNATIONAL NORMATIVE
DOCUMENTS, QUALIFICATORY
STRENGTH AND QUALITY OF
DRINKING-WATER SECURITY**

Konyk A.V.

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

To the article the analysis of operating in the world normative documents that regulate quality and safety of drinking-water is driven. The comparative table of physical and chemical, radiological, microbiological parameters and taste, smell properties of water that contains information about the maximum possible concentrations of hazardous substances is presented. In detail going is considered near determination of safe level of concentration of harmful substances. References 8, table 1.

Key words: international normative documents, physical and chemical and microbiological parameters, taste and smell properties, water.

1 *Directive 98/83 / EU council from 3 November 1998 about quality of water, appointment for use of human / <http://old.aquaexpert.ru/analytics/?id=21&t=2>. (Rus.)*

2. *Drinking water* quality standards. State standard 2874-82 (canceled), Sanitary rules and norms 2.1.4.10749-01 "Drinking water. Hygienic requirements for water quality.", EU – directive 98/83/EU "About quality of water for human consumption", international recommendations World Health Organization "The guidelines for drinking water quality 1992" Standards of the US Environmental Protection" <http://www.dpva.info/Guide/GuideTechnologyDrawings/WaterSupplyWasteWater/DrinkingWater/DrinkWater/> (Rus.)

3. *Ryabchykov B.E.* Advanced methods of water for industrial and civil use. M.: DeLy print. – 2004. – 328 p. (Rus.)

4. *Water quality.* Standards and norms. <http://akvant.com.ua/st/10.php> (Rus.)

5. *Public health* standards and regulations «Hygienic requirements for drinking water for human consumption» (Sanitary rules and norms 2.2.4-171-10). 47 p. (Ukr.)

6. *Quality of water* <http://talavoda.kiev.ua/quality-awards.html> (Rus.)

7. *State standard* for drinking water. <http://voda-resurs.ru/?p=150> (Rus.)

8. *Slanik A.V.* The use mechanisms of discrete pulse introduction energy for water treatment. Dissertation to get candidate of technical sciences – 190 p. (Ukr.)

*Получено 18.05.2015
Received 18.05.2015*