

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ
НАН УКРАИНЫ

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРИКЛАДНОЙ
ЖУРНАЛ

Выходит 6 раз в год

Основен в 1979 г.

Том 39, № 2, 2017

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.

Гелетуа 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.

Шморгуи В.В. – ответственный секретарь

Редакционный совет:

Алексееику С.В. (Россия)

Балтренае П.Б. (Литва)

Бончев Г. (Болгария)

Вацлавик Ю. (Польша)

Коверда В.П. (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)

МАТЕРИАЛИ Х МІЖНАРОДНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «ПРОБЛЕМИ ТЕПЛОФІЗИКИ ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ»

м. Київ, Україна,
23 – 26 травня 2017 р.

МЕТА КОНФЕРЕНЦІЇ:

Координація зусиль вчених, фахівців, бізнесменів у вирішенні проблем теплопостачання та ефективного використання енергоресурсів на найближчу перспективу.

ОРГАНІЗАТОРИ КОНФЕРЕНЦІЇ:

- Інститут технічної теплофізики НАН України
- Національний університет харчових технологій

За підтримки:

- Національної академії наук України
- Міністерства освіти і науки України
- Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України
- Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України
- Міністерства енергетики та вугільної промисловості України
- Комітету Верховної Ради України з питань паливно-енергетичного комплексу, ядерної політики та ядерної безпеки
- Київської міської державної адміністрації
- Рівненської обласної державної адміністрації
- Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»
- Київського національного університету будівництва та архітектури
- Національного авіаційного університету
- Національний комітет з тепломасообміну

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ:

Співголови:

- **Снежкін Ю.Ф.**, чл.-кор. НАН України, директор ІТТФ НАН України
- **Долінський А.А.**, академік НАН України, почесний директор ІТТФ НАН України
- **Українець А.І.**, професор, доктор технічних наук, ректор НУХТ

Заступники голови:

- **Бабак В.П.**, чл.-кор. НАН України, заст. директора ІТТФ НАН України
- **Авраменко А.О.**, чл.-кор. НАН України, заст. директора ІТТФ НАН України
- **Шевченко О.Ю.**, професор, доктор технічних наук, проректор з наукової роботи НУХТ, в.о. зав. кафедрою
- **Бессараб О.С.**, професор, проректор НУХТ, в.о. зав. кафедрою

Науковий секретар конференції:

- **Чайка О.І.**, канд. техн. наук

Виконавчий секретар конференції:

- **Олійник Л.В.**

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 39, № 2, 2017

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.
Гелетука 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)
Балтренас П.Б. (Литва)
Бончев Г. (Болгария)
Вацлавик Ю. (Польша)
Коверда В.П. (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)

ЗМІСТ

До 70-річчя від дня народження Ю.Ф.Снежкіна.....4

Долинский А.А., Резакова Т.А.

Вклад геотермальной энергетики в энергетическую
независимость Украины.....6

Халатов А.А.

Энергетическая безопасность Украины: сохранился ли
запас прочности?.....12

Снежкін Ю.Ф.

Енергоефективні теплонасосні технології: стан та
перспективи їх впровадження в Україні.....18

Бабак В.П.

Моніторинг об'єктів теплоенергетики з використанням
безпілотних літальних апаратів25

Авраменко А.О.

Мультимасштабний аналіз мікро- та нанотечій.....31

Фиалко Н.М.

Полимерные микро- и нанокмполиты как объекты
теплофизических исследований для элементов
теплоэнергетического оборудования.....36

Басок Б.И., Базеев Е.Т.

Повышение энергоэффективности экономики Украины –
миссия и основной приоритет развития отечественной
энергетики.....46

Сигал А.И.

Пути сокращения потребления природного газа в
коммунальной теплоэнергетике.....53

Гелетука Г.Г., Желєзна Т.А.

Стан та перспективи розвитку
біоенергетики в Україні.....60

Демченко В.Г.

Усунення загроз забезпечення теплом
інфраструктурних об'єктів.....65

Круковский П.Г., Метель М.А., Полубинский А.С.

Анализ и прогнозирование тепломассообменных
процессов и радиационного состояния
Нового Безопасного Конфайнмента и разрушенного
блока ЧАЭС на основе CFD-моделирования.....70

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF ENGINEERING

THERMOPHYSICS

INDUSTRIAL HEAT ENGINEERING

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND
APPLIED JOURNAL

Published bimonthly
Founded in 1979

Volume 39, № 2, 2017

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. Pysmenny
A. Pyatnichko
A. Sigal
Yu. Snezhkin
N. Fialko
A. Khalatov
A. Chaika
V. Shmorgun – Responsible Secretary

Advisory Editorial Board:

S. Alekseenko (Russia)
P. Baltrenas (Lithuania)
G. Bonchev (Bulgaria)
J. Wazlawik (Poland)
V. Coverda (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)

CONTENTS

To the 70-th birth anniversary of Yu.F.Snezhkin.....4

Dolinskiy A.A., Rezakova T.A.

Contribution of geothermal energy
to energy independence of Ukraine.....6

Khalatov A.A.

The energy safety of Ukraine: is there a safety margin?...12

Snezhkin Yu.F.

Energy efficient heat pump technology:
status and prospects of their introduction in Ukraine.....18

Babak V.P.

Monitoring of objects of power system using unmanned
aerial vehicles.....25

Avramenko A.A.

Multiscale analysis of micro- and nano-flows.....31

Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodskeya R.A.

Polymer micro- and nanocomposites as objects of
thermophysical research for elements of heat-power
engineering equipment.....36

Basok B.I., Bazeev T.T.

Increase of energy efficiency of Ukraine's economy –
mission and the main priority of development
of native energy.....46

Sigal O.I.

Ways of reduction of natural gas consumption in
municipal heat energy sector.....53

Geletukha G.G., Zheliezna T.A.

State of the art and prospects for bioenergy
development in Ukraine.....60

V. Demchenko

Removal threats of providing heat of infrastructural
objects.....65

Krukovskiy P.G., Metel M.A., Polubinskiy A.S.

Analysis and prediction of heat and mass transfer
processes and radioactive state of the New Safe
Confinement and destroyed unit of CNPP based on
CFD-modeling.....70

*До 70-річчя від дня народження
Юрія Федоровича Снежкіна*

*відомого вченого в галузі теплоенергетики, тепло- і массообміну теплофізичних процесів
та енергоощадних технологій, доктора технічних наук, професора,
члена-кореспондента Національної академії наук України*



2 квітня цього року виповнюється 70 років Юрію Федоровичу Снежкіну, видатному вченому, члену-кореспонденту НАН України, директору Інституту технічної теплофізики НАН України.

Після закінчення в 1971 році Київського політехнічного інституту Ю.Ф.Снежкін був направлений в Інститут технічної теплофізики НАН України, в якому розпочав свої перші наукові дослідження в галузі тепломасообміну в процесах сушіння та створення енергоощадних технологій, які в подальшому лягли в основу його кандидатської (1981 р.) та докторської (1993 р.) дисертацій. З 1996 року Ю.Ф.Снежкін – заступник директора інституту з наукової роботи, з 2016 року – директор інституту. В 1997 році ювіляр був обраний членом-кореспондентом НАН України.

Фундаментальні та прикладні наукові результати, отримані Ю.Ф.Снежкіним, добре відомі в Україні та за її межами і охоплюють такі напрямки: теплофізичні основи переробки біомаси і торфу на композиційне паливо, процеси тепломасопереносу, фазові перетворення та деформування при зневодненні колоїдних капілярно-пористих тіл, розробка нових та удосконалення існуючих енерго- та ресурсощадних теплотехнологій та обладнання, розробка методів розрахунку і впровадження схемних рішень термотрансформаторів.

За останні роки розроблена технологія, затверджені технічні умови на новий вид композиційного палива на основі торфу і біомаси, які враховують відновлювані властивості торфородовищ і використання енергетичних рослин. Робота успішно впроваджена в Волинській і Рівненській областях. Отримані гранули мають на 15...20 % більшу теплоту спалювання і на 40 % меншу зольність від традиційних. Енерговитрати створеного обладнання значно нижчі нормативних, при цьому потенціал енергозбереження сягає більше 1 млн. т у.п. на рік.

Розроблена і вперше успішно впроваджена в Україні теплонасосна установка для гарячого водопостачання на базі насосної каналізаційної станції потужністю 1,5 МВт в м. Краматорськ. Отримані питомі витрати паливно-енергетичних ресурсів на виробництво 1 Гкал теплової енергії відповідають світовим стандартам. Підраховано, що широке впровадження теплових насосів з використанням відновлюваних джерел енергії в Україні може заощадити біля 9 млрд. м³ природного газу.

Вперше створені теплоакумуючі матеріали з фазовим переходом на основі промислових парафіно-воскових сумішей. Використання цих матеріалів в системах акумулювання теплової енергії дозволяє знизити вартість теплоаккумуляторів на 35 %.

Розроблені та пройшли успішне випробування в умовах АТО сухі пайки для гарячого харчування, які відповідають кращим світовим стандартам.

Створені Ю.Ф.Снежкіним енергоощадні теплотехнології та обладнання, низка яких не мають аналогів в світі, захищені понад 146 патентами та авторськими свідоцтвами, впроваджені більш ніж на 60 підприємствах України, в країнах близького та далекого зарубіжжя, зокрема в Словаччині, В'єтнамі та ін. Результати наукової діяльності Снежкіна Юрія Федоровича знайшли своє відображення в понад 700 наукових публікаціях, в тому числі в 12 монографіях. Ним підготовлена плеяда фахівців високої кваліфікації, які успішно розвивають його наукові напрямки (2 доктори та 8 кандидатів технічних наук).

Визнанням наукових досягнень члена-кореспондента Ю.Ф.Снежкіна є його нагородження почесними званнями, грамотами, дипломами, медалями. В 1984 році Юрію Федоровичу присвоєно звання лауреата Державної премії СРСР, в 2000 році – лауреата премії, заснованої Президентами Академій наук України, Білорусі та Молдови, в 2006 році – лауреата Державної премії в галузі науки та техніки України, в 2007 році – лауреата премії НАН України ім. В.І. Толубінського, в 2012 році – звання лауреата премії ім. О.В.Ликова НАН Білорусі, нагороджений також золотою та срібною медалями ВДНГ СРСР.

Наукова діяльність ювіляра успішно поєднується з педагогічною. Ю.Ф.Снежкін – професор кафедри машин і апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», почесний професор Казахського інженерно-технологічного університету, почесний професор Південно-Східного університету м. Нанті, Китай, академік Міжнародної академії холоду. Ю.Ф.Снежкін удостоєний звання «Винахідник СРСР» (1987 р.), «Кращий винахідник Національної академії наук України» (1999 р.), нагороджений Почесною грамотою Президії НАН України (1997 р.), відзнакою Президії НАН України «За професійні здобутки» (2007 р.), Почесним знаком з нагоди 130-річчя науково-технічної спілки енергетики та електротехніки України та багатьма іншими. Крім того, Ю.Ф.Снежкін очолює спеціалізовану раду по захисту докторських дисертацій ІТТФ НАН України та член спеціалізованої ради по захисту наукового ступеня доктора (кандидата) технічних наук в ОНАХТ, голова секції «Тепломасообмін в процесах сушіння» Національного комітету по тепломасообміну, член редколегії низки наукових журналів, в тому числі Міжнародного науково-прикладного журналу «Промышленная теплотехника», очолює вчену раду Інституту технічної теплофізики НАН України, голова секції Координаційної ради по науці на інноваціям при МОН України, член секції енергетики Комітету Державних премій України в галузі науки і техніки.

Снежкін Ю.Ф. має широкий науковий кругозір, який дозволяє йому, працюючи директором, проводити значну роботу по плануванню та координації наукових досліджень в Інституті, розширенню участі вчених Інституту у виконанні проектів державних науково-технічних програм та програм фундаментальних досліджень.

Сердечно вітаємо шановного Юрія Федоровича з ювілеєм, бажаємо йому міцного здоров'я, безмежного щастя, радості, подальших творчих успіхів!

Колектив Інституту технічної теплофізики НАН України
Редакційна колегія журналу «Промышленная теплотехника»

ВКЛАД ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ НЕЗАВИСИМОСТЬ УКРАИНЫ

Долинский А.А., д.т.н., академик НАН Украины, почетный директор ИТТФ НАН Украины,
Резакова Т.А., канд. техн. наук

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

У структурі енергетичного балансу України частка імпорту енергоресурсів перевищує власний їх видобуток і виробництво, що ставить країну в серйозну залежність від імпорту, незважаючи на те, що Україна має всі можливості повністю забезпечити себе енергією. Для цього необхідно підвищувати рівень енергоефективності та сприяти поширенню використання екологічно чистих технологій відновлюваної енергетики зокрема геотермальної енергії. Геотермальна енергетика є усталеною і відносно зрілою формою комерційного використання поновлюваних джерел енергії. Важливою характеристикою є фактор високого навантаження, що означає, що кожен МВт потужності виробляє значно більше електроенергії протягом року ніж МВт вітру або сонячного потенціалу.

В структуре энергетического баланса Украины доля импорта энергоресурсов превышает собственную их добычу и производство, что ставит страну в серьезную зависимость от импорта, несмотря на то, что Украина имеет все возможности полностью обеспечить себя энергией. Для этого необходимо повышать уровень энергоэффективности и способствовать распространению использования экологически чистых технологий возобновляемой энергетики, в частности геотермальной энергетики. Геотермальная энергетика является устоявшейся и относительно зрелой формой коммерческого использования возобновляемых источников энергии. Важной характеристикой является фактор высокой нагрузки, что означает, что каждый МВт мощности производит значительно больше электроэнергии в течение года чем МВт ветра или солнечного потенциала.

In the structure of the energy balance of Ukraine, the share of energy imports exceeds their own production and production, which puts the country in a serious dependence on imports, despite the fact that Ukraine has all the possibilities to fully provide itself with energy. To do this, it is necessary to increase the level of energy efficiency and promote the use of environmentally friendly renewable energy technologies in particular geothermal energy. Geothermal energy is an established and relatively mature form of commercial use of renewable energy sources. One of the important characteristics is the high load factor, which means that each MW of power produces significantly more electricity during the year than MW of wind or solar capacity.

Бібл. 11, рис. 2, табл. 3.

Ключевые слова: энергетический баланс, угольные ресурсы, геотермальная энергетика.

Энергетическая независимость страны определяется стабильным и экономически выгодным обеспечением энергокомплекса топливными ресурсами – угля и газа для производства электрической и тепловой энергии.

Важным критерием надежности энергосистемы является показатель импортозависимости, что определяется как доля импортных компонентов в ОППЭ. В 2016 г. этот показатель составил 51,6 %, что говорит о серьезном риске для энергетической безопасности. Поэтому, вопрос уменьшения импортозависимости чрезвычайно важен и актуален для Украины. В связи с уменьшением добычи угля из-за военных действий на Донбассе фактор угроз энергетической и экономической безопасности страны возрастает.

Угольный рынок Украины характеризуется специфическими условиями производства и большой территориальной разбросанностью угледобывающих, углеперерабатывающих предприятий. Добыча и переработка угля в Украине осуществляется преимущественно в Донбассе, Львовско-Волинском угольных и Приднепровском бурогольном бассейнах.

Фактическое отсутствие угля антрацитовой группы на тепловых электрических станциях, работающих в

основной части ОЭС Украины, вынуждает максимально интенсифицировать работу энергоблоков ТЭС, переводить их на газовую группу угля, сокращать объем и количество планово – предупредительных ремонтов, что может привести к повышенной аварийности, незапланированным ремонтам, несбалансированности работы энергоблоков и, как следствие, применять меры по принудительному ограничению потребления.

Доля электроэнергии, произведенной с использованием угольной продукции, составляет около одной четверти общего производства электроэнергии. Около 45 % энергоблоков украинских ТЭС (по установленной мощности) работают на угле антрацитовой группы, около 35 % – на угле газовой группы, и около 20 % – на газе.

В течение 2001-2013 гг. в Украине ежегодно добывалось около 80 млн. т необработанного (рядового) угля, около 2/3 которого используется в электро- и теплоэнергетике. По данным Министерства энергетики и угольной промышленности [1], в 2015 г. объем добычи угля в Украине составил 39,7 млн. т, что на 38,8 % меньше по сравнению с 2014. Потребление энергетического угля на украинских теплоэлектростанциях в 2015 году сократилось на треть по сравнению с предыдущим годом – до 27 млн. тонн. Производство тепловой генера-

ции уменьшилось, спрос на уголь снизился с 38 млн. тонн до 27 млн. тонн [1].

Из-за сокращения собственной добычи угля в 2015 г. примерно на 40 %, Украина была вынуждена наращивать его импорт.

Министерство энергетики и угольной промышленности констатирует, что в январе 2017 года на украинские теплоэлектростанции (ТЭС) было поставлено 93,5 тысячи тонн энергетического угля из России, что

составило 57,2 % от общего объема импортных поставок [2].

В январе-феврале 2017г. Украина импортировала 2 млн. 463,529 тыс. т каменного угля и антрацита (табл. 1): из РФ поступило угля доля в импорте 69,1 %, из США – доля в импорте 18,3 %, из Казахстана – доля 5,7 %, из других стран – доля 6,9 % (рис. 1, а). Таким образом, импорт угля и антрацита за этот период вырос в 2,1 раза по сравнению с январем-февралем 2016 [2, 3, 4].

Табл. 1. Общая добыча угля в Украине

Тип угля	Декабрь 2016 год	Январь 2017 год
Энергетический уголь, млн. т	2,5	3,1
Коксовый уголь, млн. т	0,7	0,6
Всего по Украине	3,2	3,7

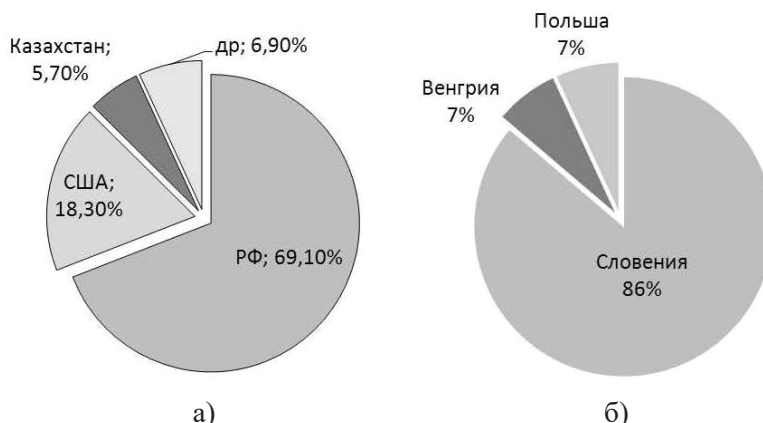


Рис. 1. Импорт угля (а) и газа (б) в январе – феврале 2017 г.

Не менее сложная ситуация с добычей, потреблением и импортом природного газа. По результатам 2016 г. (табл. 2) потребление природного газа Украины составило 30,3 млрд. куб. м. [5]. Для покрытия потребностей отечественного потребления использовался природный газ импортированный из Европы – 11,1 млрд. куб. м и собственной добычи – 20,2 млрд. куб.

В январе-феврале 2017 года Украина увеличила импорт природного газа на 30 % (на 651,5 млн. куб. м) по сравнению с аналогичным периодом 2016 года – до

2 млрд. 819,8 млн. куб. м [5]. В том числе со стороны Словакии в январе-феврале было импортировано 2 млрд. 407,8 млн. куб. м, Венгрии – 179,9 млн. куб. м, Польши – 232 млн. куб. м. (рис.1, б).

Как видно, разница между потребностью отрасли и собственными ресурсами составляет более 30 %. Для покрытия дефицита страна вынуждена импортировать как природный газ, так и уголь. Разница должна покрываться за счет либо импорта, либо искать альтернативные решения.

Табл. 2. Потребление, добыча газа и угля в Украине

Вид топлива	Общее потребление	Собственная добыча	Импорт
2016 г.			
Газ, млрд. м ³	30,3	20,2 (63 %)	11,1 (37 %)
Уголь, млн. т (в т.ч. энергетический коксовый)	30,1	40,9 (32,5) (8,4)	10,5 (35 %)
Январь - февраль 2017 г.			
Газ, млрд. м ³	5,2	1,7	2,9
Уголь, млн. т	4,9	3,7	2,5

Годовой объем тепловой энергии, производимой в Украине, в 2016 г. составляет 97,5 млн. Гкал.

Основными потребителями тепловой энергии являются ЖКХ и население (около 70 %), промышленность (20 %), другие отрасли экономики вместе потребляют около 10 % теплоты [6].

Наряду с высоким показателем импортозависимости не менее серьезным обстоятельством является степень изношенности основных производственных мощностей энергогенерации, сетей теплоснабжения и низкой надежности и качества сетей передачи электроэнергии.

В 2016 г. энергетика Украины работала в форсированном режиме. Основную долю нагрузки несли атомные электростанции, технически задействована мощность которых увеличилась. По этой причине ряд профилактических работ пришлось срочно отложить.

Проектный срок эксплуатации энергоблоков АЭС составляет 30 лет. В ближайшие 10 лет он заканчивается для 12 блоков из 15, находящихся в эксплуатации. Продление срока эксплуатации еще на 15...20 лет базируется на снижении мощности блоков.

Все 14 крупных ТЭС Украины работают на угле. Добыча антрацитового угля производится преимущественно на шахтах, которые находятся на территориях, подконтрольных т.н. «ДНР» и «ЛНР» и производственные мощности, которые обеспечивают добычу 1,5...1,6 млн. т антрацита в месяц, заблокированы.

Основными проблемами для энергетики Украины являются: 50 % зависимость от импорта газа и угля, потеря контроля над большим количеством угледобывающих предприятий через оккупацию восточных областей, критический уровень износа генерирующих источников, недостаточный уровень внедрения новейших технологий.

В сложившейся ситуации энергонеизависимость может быть осуществлена при условии глубокой модернизации существующих мощностей энергогенерации и инфраструктуры, сокращения показателя импортозависимости.

В настоящее время в мире интенсивно развивается направление развития возобновляемой энергетики. Особенно впечатляющим рост "чистой энергетики" (так возобновляемые источники называют в докладах Международного энергетического агентства – сокращенно МЭА) [8] произошел за последнее десятилетие. В период с 2006 года по 2015 год суммарные установленные мощности возобновляемой энергии выросли на 48 %. При этом мощности ветровой энергетики выросли почти в шесть раз, а солнечной – в 33 раза.

Европейский Союз – один из лидеров в развитии возобновляемых источников энергии. По оценке British Petroleum (BP), на его долю приходится более 37 % мирового потребления возобновляемой энергии, в то время как на долю США – 20 %, Китая – 17 %. В двухтысячные годы в ЕС сформировалась полноценная политика стимулирования ВИЭ. В 2009 году была принята Директива 2009/28 по развитию возобновляемой энергетики, которая закрепила эту политику юридически.

С 2006 года по 2014 год общее производство возобновляемой энергии в ЕС выросло на 66 %, среднегодовой прирост составил 7,3 %. За последнее десятилетие ежегодные инвестиции в чистую энергетику составляли в среднем более 73 млрд. долл.

Германия стала первой развитой страной мира, решившей со временем полностью отказаться от углеводородных и ядерных энергоносителей. Новая немецкая энергополитика, получившая название *Energiewende* ("энергетический разворот"), даст возможность предотвратить необратимые климатические изменения и обеспечить энергобезопасность страны.

Италия стала страной, которая закрыла все имевшиеся АЭС и полностью отказалась от ядерной энергетики. Бельгия, Германия, Испания, Швейцария, Тайвань осуществляют долгосрочную политику по отказу от ядерной энергетики. Польша по политическим и экономическим причинам остановила программы атомной энергетики и не завершила начатое строительство своих первых АЭС. В этих странах интенсивно развиваются возобновляемые источники энергии, в том числе геотермальные.

Австрия является одним из мировых лидеров по объему энергии, вырабатываемой альтернативными источниками, в общем объеме энергии, потребляемом государством. По итогам 2012 года 25 % всей энергии, произведенной в Австрии, приходилось на возобновляемые источники, такие как ветровые электростанции, солнечная энергетика, биогаз и малые гидроэлектростанции. По прогнозам ученых уже в 2030 году Австрия может полностью, на 100 %, перейти на обеспечение собственных нужд за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [9].

В Украине также существует острая необходимость поиска и использования альтернативных способов энергообеспечения на базе инновационных решений. Вместо восстановления и поддержания морально и физически устаревших технологий и оборудования, наряду с развитием атомной, тепловой и гидроэнергетики должно стать более широкое использование инновационных энергетических технологий, в том числе гео- и петротермальной энергетики, теплонасосных технологий.

На сегодняшний день из всех видов возобновляемых источников энергии наиболее коммерчески выгодной является геотермальная энергетика, самая конкурентоспособная с точки зрения экономической эффективности и с точки зрения стоимости. Это связано с тем, что в отличие от других возобновляемых источников энергии, геотермальная энергетика не зависит ни от климатических условий, ни от погодных условий, ни от суточных изменений, и как следствие – коэффициент использования геотермальных станций самый высокий. Геотермальные электростанции позволяют иметь коэффициент использования установленной мощности до 90 %, в отличие 25...30 % по ветру и солнцу. Два этих фактора влияют на то, что коммерческая эффективность геотермальных электрогенерирующих установок крайне высокая и поэтому в мире развивается довольно активно.

Украина имеет значительные ресурсы геотермальной энергии, которые в тепловом эквиваленте превышают запасы традиционного энергетического топлива. По прогнозной оценке в верхнем 3-километровом слое земной коры недр Украины содержится 9,2 млрд. ГВт·ч.

энергии, что эквивалентно почти 1000 трлн. м³ газа, а в верхнем 10-километровом слое земной коры недр Украины содержится 19 млрд. ГВт·ч (эквивалент 2070 трлн. м³ газа) (табл. 3).

Таблица 3. Общий энергетический потенциал геотермальной ресурсов Украины

Энергетические ресурсы	Величина энергетического потенциала, ГВт·ч	Энергетический потенциал в газовом эквиваленте, м ³ природного газа
Тепловой энергетический потенциал термальных вод на глубине 3 км	70 тыс. ГВт·ч	7,5 млрд. м ³ природного газа
Тепловой энергетический потенциал геотермальных ресурсов Украины с учетом теплоты сухих горных пород на глубине 3 км и геотермальных тепловых насосов	9,2 млрд. ГВт·ч	1000 трлн. м ³ природного газа
Тепловой энергетический потенциал геотермальных ресурсов Украины на глубине до 10 км	19,18 млрд. ГВт·ч	2070 трлн. м ³ природного газа

Как видно из приведенных данных, ресурсы геотермальной теплоты смогут обеспечить работу геотермальных электростанций (ГеоТЭС) общей мощностью до 200...250 тыс. МВт при глубинах бурения скважин до 7 км. Систем геотермального теплоснабжения общей мощностью до 1,2...1,5 млн. МВт при глубинах бурения скважин до 4 км. Период работы этих систем составляет до 50 лет. Это позволит замещать более 8,4 млрд. м³ газа в год, то есть почти 100 % потребностей газа в ком-

мунальную энергетику страны.

В Украине технически возможный потенциал использования геотермальной энергии составляет 53,58 млн. МВт·часов и сосредоточен, главным образом, в Закарпатской, Прикарпатской, Полтавской, Харьковской областях. Этот потенциал позволяет реализовать мощности по производству тепловой энергии в объеме 12,4 ГВт и электроэнергии в 414 МВт.



Рис. 2. Регионы Украины перспективные для развития геотермальной энергетики.

По прогнозной оценке ИТТФ НАН Украины технически доступный потенциал энергии геотермальных вод в 8-ми наиболее перспективных для внедрения областях Украины, составляет почти 16,68 тыс. ГВт·ч. в год. Это позволит производить около 13,5 тыс. ГВт·час. в год тепловой и 2,3 тыс. ГВт·час. в год электроэнергии, что эквивалентно уменьшению потребления природного газа на 2,2 млрд. м³ в год.

На территории газонефтяных месторождений имеется около 20 тысяч пробуренных законсервированных скважин. Для определения возможности использования этих скважин при создании геотермальных систем необходимо провести исследования: техническое состояние скважин, дебиты, температура теплоносителя и др. На основании полученных результатов определить техническую и экономическую целесообразность использо-

вания их для создания геотермальных систем.

В перспективных 8 областях в год потребляется около 8,0 млн. т угля (7,0 т у. т.), тепловой энергии – 1,8 т у. т. По расчетам тепловой потенциал геотермальной энергии в этих областях составляет 2,1 млн. т у. т., что соответствует 30 % от используемого угля.

В 2016 г. импорт угля в Украину составил в эквиваленте 9,2 млн. т у. т. Использование геотермальной энергии только в 8-ми областях (2,1 млн. т у. т.) сможет снизить импорт угля на 22 %.

Проблемой использования геотермального теплоносителя Институт технической теплофизики занимается с 60-х годов XX века. Академиками А.Н. Щербанём и А.А. Кремневым была предложена идея замкнутого контура – извлечение из земных глубин горячей воды, отбор ее теплоты и возвращение охлажденной воды в тот же водоносный горизонт (ГЦС). Впервые этот метод применен во Франции. Он так и называется «Украинский способ получения геотермальной энергии». Сейчас эта технология применяется во всем мире.

Доктор технических наук Шурчков А.В. с сотрудниками Института отработали технологию отбора теплоты из теплоносителя, имеющего высокую минерализацию. Итогом этой работы стало строительство Паужетской, Паратунской и Мутновской геотермальных электростанций на Камчатке. Была создана система моделирования процессов, протекающих под землей, для проектирования станций. В Институте были разработаны научные основы создания ГЦС. Были созданы опытно-промышленные и промышленные установки. В 1981 г. две опытно-промышленные геотермальные циркуляционные системы находились в эксплуатации на Ханкальском месторождении (г. Грозный), в 1983 г. – в Сакском районе АР Крым. Совместно с Институтом «Атомтеплоэлектропроект» было начато проектирование геотермальных электростанций с подземными циркуляционными системами для трех районов: в Ставропольском крае, в Дагестане, в Закарпатье. Разработаны научные основы проектирования и создания циркуляционных систем отбора теплоты из сухих горных пород. Была разработана теория тепломассопереноса в природных и искусственно созданных геотермальных системах земной коры. Разработана методика геолого-экономической оценки петротермальных ресурсов.

В 1996 г. Институтом технической теплофизики была разработана Государственная целевая программа «Экологически чистая геотермальная энергетика», утвержденная КМ Украины №100 от 17.01.1996 г. В рамках данной программы построена станция в с. Медведовка (АР Крым), модернизирована станция в с. Янтарное (АР Крым), построены геотермальные установки в с. Берегово и Косино (Закарпатская обл.). Институтом были разработаны 6 проектов и бизнес-планов геотермальных станций для Закарпатья, Полтавской, Черниговской областей и АР Крым, были спроектированы и построены 12 геотермальных станций на территории Крымского полуострова. До настоящего времени работают 9 геотермальных станций: 3 в Закарпатье, 1 в Херсонской обл., 5 – в АР Крым.

После закрытия Программы в Украине прекратились все работы по использованию геотермальной энергии, в то время, когда наши ближайшие соседи широкими темпами изучают и внедряют геотермальные источники в энергетические системы своих стран. В РФ, которая является мощнейшим поставщиком газа, более 50 институтов занимаются изучением использования геотермальной энергии, в Беларуси работают около 100 теплонасосных геотермальных установок, в Прибалтийских странах начато внедрение ГеоТЭС, в Польше установленная мощность геотермальных станций составляла 98,84 МВт, 6 систем централизованного отопления установленной мощностью 82,2 МВт [10].

Во Франции установленная мощность геотермальных станций, включая геотермальные тепловые насосы, составляет 2 346,9 МВт, что позволяет сократить выбросы в атмосферу CO₂ около 1,8 млн. тонн. В окрестностях Парижа 33 геотермальных установки отапливают 170 тысяч домов, получая эквивалентную экономию 144,4 млн. м³ природного газа. В 2015 году планируется запустить в эксплуатацию геотермальную централизованную систему мощностью 48 МВт, протяженностью 13 км, обеспечив отоплением и горячим водоснабжением 10 тысяч домов, сократив при этом выбросы CO₂ на 14,6 тысяч т в год. Геотермальные тепловые станции должны обеспечить 60 % потребности в теплоэнергии г. Парижа и его окрестностей [11].

В Европе, наряду с циркуляционными геотермальными станциями, нашли широкое применение геотермальные тепловые насосы. Их доля в производстве геотермальной теплоты составляет до 70 %. В Украине эти технологии также слабо развиваются, несмотря на то, что они позволяют улучшить экологическую ситуацию и сократить расходы топлива.

Несмотря на сложившуюся в стране критическую ситуацию с энергетическими ресурсами, руководящие органы, профильные министерства, отраслевые институты не уделяют должного внимания развитию альтернативных источников энергии, в частности, геотермальной энергетики, не учитывают мировой опыт, не используют отечественные разработки. Выходом из сложившейся ситуации может быть создание Государственной программы развития альтернативных источников энергии, в т. ч. гео- и петротермальной энергии, что с учетом мирового и отечественного опыта позволит в короткие сроки нарастить мощности экологически чистой и экономически выгодной энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Енергетична галузь України: підсумки 2015 року* [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: www.razumkov.org.ua
2. *Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Статистична інформація* [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://mpe.kmu.gov.ua>
3. *Інформаційна довідка* про основні показники розвитку галузей паливно-енергетичного комплексу України за січень 2017 року (за фактичними даними)

[Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://mpe.kmu.gov.ua>

4. [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://interfax.com.ua/news/economic/406585.html>

5. ПАТ«УКРПАНСГАЗ» [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://utg.ua>

6. Паливно-енергетичні ресурси України [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: www.ukrstat.gov.ua

7. Енергетична стратегія України до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність” [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog

8. International Energy Agency. Statistics. [Элек-

тронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <https://www.iea.org/>

9. [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: http://www.c-o-k.ru/market_news/energetika-avstriei-k-2030-godu-budet-polnost-yu-vozobnovlyemoy

10. Beata Kepinska. Geothermal energy country update report from Poland, 2010 – 2014 [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

11. French know-how in the field of geothermal energy. District heating and electricity generation systems [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: www.ademe.fr

CONTRIBUTION OF GEOTHERMAL ENERGY TO ENERGY INDEPENDENCE OF UKRAINE

Dolinskiy A.A., Rezakova T.A.

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

In the structure of the energy balance of Ukraine, the share of energy imports exceeds their own production and production, which puts the country in a serious dependence on imports, despite the fact that Ukraine has all the possibilities to fully provide itself with energy. To do this, it is necessary to increase the level of energy efficiency and promote the use of environmentally friendly renewable energy technologies in particular geothermal energy. Geothermal energy is an established and relatively mature form of commercial use of renewable energy sources. One of the important characteristics is the high load factor, which means that each MW of power produces significantly more electricity during the year than MW of wind or solar capacity.

Key words: energy balance, coal resources, geothermal energy.

1. The energy sector in Ukraine: results of 2015 [Electronic resource]. Resource Access: www.razumkov.org.ua

2. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine.

Statistical information [Electronic resource]. Resource Access: <http://mpe.kmu.gov.ua>

3. Background of the main indicators of the fuel and energy complex of Ukraine for January 2017 [Electronic resource]. Resource Access: <http://mpe.kmu.gov.ua>

4. [Electronic resource]. Resource Access: <http://interfax.com.ua/news/economic/406585.html>

5. PJSC "Ukrtransgaz" [Electronic resource]. Resource Access: <http://utg.ua>

6. PJSC "Ukrtransgaz" [Electronic resource]. Resource Access: www.ukrstat.gov.ua

7. Energy Strategy of Ukraine till 2035 "Safety, efficiency, competitiveness" [Electronic resource]. Resource Access: mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog

8. International Energy Agency. Statistics. [Electronic resource]. Resource Access: <https://www.iea.org/>

9. [Electronic resource]. Resource Access: http://www.c-o-k.ru/market_news/energetika-avstriei-k-2030-godu-budet-polnost-yu-vozobnovlyemoy

10. Beata Kepinska. Geothermal energy country update report from Poland, 2010 – 2014 [Electronic resource]. Resource Access: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

11. French know-how in the field of geothermal energy. District heating and electricity generation systems [Electronic resource]. Resource Access: www.ademe.fr

Получено 24.03.2017

Received 24.03.2017

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ УКРАИНЫ: СОХРАНИЛСЯ ЛИ ЗАПАС ПРОЧНОСТИ?

А.А. Халатов, академик НАН Украины

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев-57, 03057, Украина

Рівень енергетичної безпеки України визначається декількома показниками, кожен з яких має індивідуальне порогове значення. Сьогодні значна частина цих показників знаходиться на межі між небезпечним і критичним станами.

Уровень энергетической безопасности Украины определяется несколькими показателями, каждый из которых имеет индивидуальное пороговое значение. Сегодня большая часть этих показателей находится на границе между опасным и критическим состояниями.

The level of energy security of Ukraine is determined by several indicators, each of which has an individual threshold value. Currently most of these indicators are on the border between its dangerous and critical state.

Библ. 4.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, топливная база, тепловая и атомная энергетика, газотранспортная система, энергоэффективность и энергосбережение.

Введение

Энергетическая безопасность страны является одной из важных составляющих ее экономической безопасности [1]. Она характеризует способность государственной системы в стабильных и нестабильных условиях обеспечивать население, промышленность и сельское хозяйство энергоносителями, тепловой и электрической энергией в объеме и качестве необходимыми для их устойчивого и надежного функционирования. С 1996 по 2011 г.г. интегральный показатель экономической безопасности Украины увеличивался с 49 % до 60 % (наивысший показатель в 2008-09 г.г.), но в дальнейшем наметилась устойчивая тенденция к его падению. Сегодня 7 из 10 показателей экономической безопасности страны находятся в опасной или критической зоне [1].

Оценка энергетической безопасности страны является сложной научно-технической проблемой и пока отсутствует унифицированная методика оценки ее состояния. В методике Организации Объединенных Наций (ООН) и Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) для оценки энергетической безопасности используются 14 показателей (индикаторов), Мировой банк в своей методике использует 39 индикаторов, в Молдавии с учетом особенностей ее энергетики сформирована система из 24 показателей, а в Узбекистане используют только 4 показателя.

Методика расчета энергетической безопасности Министерства экономики Украины (2007) включает 9 показателей-индикаторов [1], которые сравниваются с установленными для них «пороговыми» значениями. Среди них – энергоемкость внутреннего валового продукта (ВВП) в [кг у.т. / грн], «пороговое» значение которой составляет 0,2...0,5; степень обеспеченности страны топливно-энергетическими ресурсами (ТЭР) (не менее 100 %); доля собственных источников в балансе ТЭР страны (не менее 50 %); доля доминирующего топливного ресурса в ТЭР страны (не более 30 %); износ основных фондов предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК) (не более 50 %); доля инвести-

ций в предприятия ТЭК по отношению к ВВП (3...4 %); транзит природного газа (не менее 175 млрд. м³) и нефти (не менее 56...65 млн. т), объем добычи угля (70...100 млн. т); доля импорта топлива из одной страны в общем объеме (не более 30 %). Сегодня зависимость Украины от поставок энергоносителей из других стран составляет 65 % (в Евросоюзе – 51 %). Условием энергетической безопасности любой страны является поставка энергоносителей из 3-4 независимых стран.

В связи с серьезными изменениями, которые произошли в экономике, численности населения и политической жизни Украины в последние годы, показатели этой методики должны быть скорректированы.

Наивысший уровень энергетической безопасности (65 %) Украина имела в 2008 г., хотя это ниже уровня устойчивой работы энергетического сектора (80 %). Сегодня уровень энергетической безопасности Украины, определяемый по методике [1], составляет около 50 %, что находится на границе между опасным и критическим состоянием. Показатель научно-технического прогресса, характеризующий инновационные процессы в энергетике, также находится на границе между опасным и критическим уровнем.

Топливная база энергетики

Основным энергоносителем для тепловых электростанций (ТЭС) Украины является уголь. Подтвержденные запасы угля в Украине значительны, они составляют около 56 млрд. тонн, из которых 93 % приходятся на Донецкий бассейн (6 место в мире), где главное место принадлежит антрациту (уголь марки А). Тепловые станции Украины используют уголь различных марок, однако 50 % энергоблоков (7 из 14) суммарной установленной мощностью около 11 ГВт, используют только уголь марки А (антрацит) и Т (тощий уголь).

Еще в 2010 г. собственная обеспеченность углем энергетики Украины оценивалась на уровне 90 %, что является высоким показателем. Военные действия на Юго-Востоке страны, которые начались в 2014 г., при-

вели к существенным изменениям в структуре угледобывающей промышленности Украины. Если в 2012 г. в Украине добывали около 86 млн. тонн угля, то в 2014 г. добыто 65 млн. тонн угля, а в 2015 г. – около 40 млн. тонн. Это потребовало импорта энергетического угля – в 2016 г. поставки из Луганской и Донецкой областей составили 6,8 млн. тонн, в 2016 г. – 9,2 млн. тонн. С начала 2017 г. по 15.03.2017 г. Украина получила из Луганской и Донецкой областей 1,7 млн. тонн угля антрацитовой группы (из ЮАР – только 39 тыс. тонн). Отметим, что примерно такое же количество антрацитового угля (1,7 млн. тонн) поступило из ЮАР за три года с 2014 по 2017 г.г. Прогнозы показывают, что в 2017 г. для ТЭС и ТЭЦ Украины необходимо 26,54 млн. тонн угля (импорт – 5,6 млн тонн).

В 2011 г. Украина использовала 59,3 млрд. м³ природного газа в год, а собственная добыча составляла 14,5 млрд. м³. Оккупация Крыма привела к потере примерно 2,0 млрд. м³ газа ежегодно. В 2015 и 2016 г.г. собственная добыча газа составила 18 млрд. м³, а его потребление снизилось до 33...34 млрд. м³. В настоящее время собственное потребление газа в Украине стабилизировалось на этом уровне. В 2015 г. около 16 млрд. м³ газа поступало из России и Европы; а в 2016 г. природный газ в Украину поступал из Европы по реверсной схеме (11,1 млрд. м³). В 2015 г. в связи с ростом цен и рядом ограничений потребление газа населением снизилось на 25 %, а промышленностью – на 22 %. Собственная добыча газа в Украине практически не растет по причине слабого финансирования работ по разведке и освоению новых месторождений.

В 2016 г. в Украине добыто 1 млн. 612 тыс. т нефти, что на 11 % меньше чем в 2015 г., только за один год потребление нефти снизилось на 70,5 %. Сегодня в связи с недостатком нефти в Украине работает (да и то неустойчиво) только один Кременчугский нефтеперерабатывающий завод (НПЗ). В 2016 г. транзит нефти по территории Украины в Европу составил 13,82 млн. тонн, что на 8,8 % меньше чем в 2015 г. В 2016 г. доля транзитного объема в транспортировке нефти составила 90,8 %.

Таким образом, такие важные индикаторы как уровень собственной добычи энергоносителей, доля собственных источников в энергетическом балансе страны и доля транспорта энергоносителей в Европу не удовлетворяют условиям энергетической безопасности страны.

Производство и потребление электроэнергии

Основу электроэнергетики Украины составляют тепловые (ТЭС), атомные (АЭС), гидро- (ГЭС) и гидроаккумулирующие (ГАЭС) электростанции. Их суммарная установленная мощность составляет около 54 ГВт. В период с 2011 по 2013 г.г. производство электроэнергии в Украине практически стабилизировалось и в 2013 г. оно составляло 194 млрд. кВт. ч, т.е. чуть более 3500 кВт. ч на душу населения (56 место в мире). В 2014 г. вследствие событий на Юго-Востоке страны производство электроэнергии упало до 182 млрд. кВт. ч, в 2015 г. оно снизилось до 157,3 млрд. кВт. ч, а в 2016 г. – составило

157,7 млрд. кВт. ч. Тем не менее, в связи с сокращением населения Украины до 42,5 млн. (2017) годовое производство электроэнергии на душу населения возросло до 3700 кВт. ч.

На тепловых электростанциях в 2013 г. было выработано 49 % электроэнергии, а на атомных – 42,9 %. В 2015 и 2016 г.г. суммарная доля тепловой энергетики в общем объеме производства электроэнергии составила 35,2 % и 36,5 %, соответственно. Атомная энергетика в 2015 и 2016 г.г. работала в форсированном режиме, в этот период она выработала 55,6 % и 52,3 % электроэнергии, соответственно.

С 2005 г. в Украине отмечается устойчивый рост потребления электроэнергии населением. В 2013 г. оно составило 28,1 % от электроэнергии, произведенной в стране, а затраты коммунально-бытовых потребителей – 12,6 %. В 2015 г. потребление электроэнергии населением возросло до 30,6 %, промышленность и коммунально-бытовые потребители использовали 42,4 % и 12,8 %, соответственно. С 2011 г. потребление электричества населением стало больше, чем в любой другой отрасли промышленности Украины, в том числе в металлургии.

Одной из главных проблем энергетики Украины является изношенность основных фондов производства, транспортирования и распределения электроэнергии, которая превышает 60 % (в тепловой энергетике – 85 %). Недостаток технически задействованных мощностей составляет 3...5 ГВт. Потери при транспортировании электроэнергии составляют 12...16 %, что существенно выше европейской нормы (5...6 %).

Тепловая энергетика

Тепловая энергетика Украины (блоки 150, 200 и 300 МВт) создана в 60...70 г.г. XX в. и сегодня почти 85 % ее мощностей превысили границу физического износа (200 тыс. час) [2, 4]. Среднегодовой коэффициент использования установленной мощности ТЭС Украины в 2013 г. составил только 31% (мировой показатель – 40 %, в США – более 60 %).

В настоящее время 26 блоков суммарной мощностью 6,7 ГВт эксплуатируются уже 200...250 тыс. часов (за пределами физического износа), 43 блока суммарной мощностью 10,4 ГВт – 250...300 тыс. часов, а 11 блоков мощностью 150 и 200 МВт (2 ГВт) превысили границу запредельного срока эксплуатации (300 тыс. часов). Значительно возросло количество аварийных остановок блоков (почти ежедневно), средний электрический КПД ТЭС Украины снизился до 29...31 %, в то время как за рубежом лучшие энергоблоки докритического давления достигли КПД 40 %, а КПД блоков сверхкритического давления находится в пределах 50...55 %. Хотя установленная мощность тепловой энергетики Украины составляет около 30 ГВт, но фактическая мощность в 2015 г. составляла только 21,8 ГВт, что обусловлено авариями, простоями и ремонтными работами, консервацией устаревшего оборудования.

До 2020 г. в Украине не планируется строительство новых энергоблоков, а только реконструкция с продлением сроков их эксплуатации на 15...20 лет. Это снижа-

ет финансовые затраты на поддержание тепловой энергетики в работоспособном состоянии (400...600 долл. США за 1 кВт установленной мощности), но не способствует ее коренной модернизации. К 2024 г. вследствие необходимости вывода из эксплуатации морально и физически устаревшего оборудования установленная мощность ТЭС может снизиться до 14 ГВт, к 2028 – до 12 ГВт и к 2033 г. – до 7,7 ГВт. К 2028 г. дефицит мощностей тепловой энергетики Украины может составить около 7 ГВт.

Удельные затраты условного топлива на ТЭС Украины велики и при работе ТЭС на антраците превышают 400 г условного топлива (у.т.) на производство 1 кВт·ч электроэнергии. По экологии ТЭС Украины не соответствуют европейским нормам. Показатели тепловых электростанций составляют 400...3200 мг/н м³ по твердым частицам, 600...9000 мг/н м³ – по диоксиду серы и 400...1600 мг/н м³ – по оксидам азота. Тепловая энергетика Украины дает более 50 % выбросов оксидов азота, более 60 % оксидов серы и 30 % твердых частиц. Украинские ТЭС не имеют сероочистки, выбросы двуокиси углерода от тепловой энергетики Украины составляют более 2,2 т на 1 человека в год.

Энергетика Украины работает в условиях неравномерного графика нагрузок. «Ночной провал» в 2012-13 г.г. составлял около 7 ГВт, который практически сохранился в 2015-16 г.г. Отсутствие маневровых мощностей в достаточном объеме приводит к необходимости использования тепловой энергетики в условиях переменной нагрузки, что отрицательно сказывается на эксплуатационной надежности энергетического оборудования и его более быстрому износу.

В 2014 г. в зоне Луганской и Донецкой обл. остались 4 тепловых электростанции общей установленной мощностью около 5 ГВт, что составляет 26,5 % от технически задействованной мощности ТЭС Украины. В настоящее время возникла проблема, связанная с поставками угля антрацитовой группы из Донбасса (как указывалось выше, таких электростанций в Украине 50 %, их суммарная установленная мощность около 11 ГВт) поскольку украинские ТЭС спроектированы на использование угля Донецкого бассейна. Переход тепловых электростанций на использование угля марки Г (газовый) принципиально возможен, но сопряжен с большими финансовыми затратами. Средняя стоимость перевода блока ТЭС мощностью 200...300 МВт на уголь марки Г составляет около 10 млн. долл. США и занимает почти 2 года.

К сожалению, ЮАР, Австралия и Польша не в состоянии восполнить недостаток угля антрацитовой группы. По данным Министерства энергетики и угольной промышленности Украины в 2014-17 г.г. Украина закупила в ЮАР 1,75 млн. тонн угля антрацитовой группы, в то время как за этот период из Донецкого региона поступило 17,7 млн. тонн. Стоимость 1 тонны угля из ЮАР обошлась Украине в 3,1 тыс. грн., тогда как стоимость поставок из Донецкого региона составила 1,7 тыс. грн. Высокая стоимость импорта угля приводит к постоянному росту тарифов на электроэнергию для населения

и промышленности.

Состояние тепловой энергетики Украины находится в критическом состоянии, в ближайшие 8...10 лет следует ожидать снижения ее мощности. Подавляющее большинство блоков (85 %) выработали границу физического износа (200 тыс. час), они характеризуются низким КПД, высокими удельными затратами топлива на производство единицы электрической энергии, большими выбросами вредных продуктов в окружающее пространство. Большие проблемы возникли с обеспечением ТЭС Украины углем антрацитовой группы, поставки угля из ЮАР и других стран не могут компенсировать поставки из Донецкого региона. Доля инвестиций в предприятия тепловой энергетики страны не способствует ее глубокой модернизации.

Атомная энергетика

Установленная мощность атомной энергетики Украины составляет 13,8 ГВт [2, 4]. В стране эксплуатируются 4 АЭС (15 блоков), в том числе самая большая в Европе Запорожская АЭС установленной мощностью 6 ГВт. В 2014-16 г. вследствие проблем в тепловой энергетике атомная энергетика Украины работала в форсированном режиме. Ее технически задействованная мощность была увеличена до 10,35 ГВт, а коэффициент использования установленной мощности возрос до 70 % (в США – он составляет 90 %). В 2013 г. на атомных станциях было выработано 42,9 %, а в 2015 и 2016 г.г. – 55,6 % и 52,3 % электроэнергии. Ядерное топливо для АЭС практически полностью импортировалось из России.

Атомные блоки Украины близки к концу проектного срока эксплуатации (30 лет), в ближайшие 10 лет для 4 блоков он завершается. До 2025 г. из эксплуатации могут быть выведены 2 блока Южно-Украинской и 2 блока Ривненской АЭС, что снизит общую мощность АЭС Украины на 20 %. К 2030 г. возникнет необходимость вывода из эксплуатации еще 5 блоков Запорожской, Южно-Украинской и Хмельницкой АЭС. Продление срока эксплуатации блоков АЭС на 15...20 лет (в США они работают до 60 лет) требует серьезного научно-технического обоснования и больших инвестиций. Продление срока эксплуатации только одного блока АЭС оценивается на уровне 100 млн. долл. США, а постройка нового блока – требует от 3 до 5 млрд. долл. США.

Атомная энергетика Украины обеспечивает сегодня более 50 % производства электроэнергии. Сегодня важной проблемой атомной энергетики является научно-обоснованное продление еще на 10...15 лет безопасной работы ядерных реакторов и разработка программы строительства новых реакторов. Украина зависит от поставок ядерного топлива из России. Строительство в Украине завода по производству ядерного топлива задерживается из-за отсутствия необходимых средств.

Гидроэнергетика

Установленная мощность ГЭС и ГАЭС Украины составляет 5,5 ГВт [2, 4]. Одной из крупных является Днепровская ГЭС (1,57 ГВт), а наиболее крупной ГАЭС – Ташлыкская (0,9 ГВт). Особенностью их работы является высокая маневренность – их регулировочный ко-

эффект составляет 100 %, в то время как для ТЭС он равняется 20...30 %, а для АЭС – только 10...15 %. Поэтому наряду с выработкой электроэнергии ГЭС и ГАЭС широко используются для регулирования графика нагрузки электрической сети. Особенно важно наличие маневровых мощностей для устойчивой работы атомной энергетики, которая работает, главным образом, в базовом режиме.

Сегодня маневровые мощности энергосистемы Украины составляют только 9 % от установленной мощности, в то время как минимально необходимый уровень в Европе составляет 20 %. Агрегаты ГЭС и ГАЭС обеспечивают покрытие «пиковой» части суточного графика нагрузки только на 40...50 %, а остальная часть покрывается за счет работы ТЭС в маневровом режиме – с разгрузкой в ночное время (на 4...6 часов) 12-15 блоков зимой и 7-8 блоков – летом.

Энергосистеме Украины требуется около 15 ГВт маневровых мощностей, поэтому недавно Правительством Украины принята программа развития гидроэнергетики страны. В ближайшей перспективе планируется достроить Днестровскую и Ташлыкскую ГАЭС и построить Каневскую ГАЭС; тем не менее, дефицит «пиковой» мощности в Украине может сохраниться до конца 2030 г. В отличие от Европы Украина не использует для покрытия маневровых мощностей энергетические газовые турбины, которые обладают высоким коэффициентом маневренности (100 %), эксплуатационной надежностью, быстрым набором мощности и высоким КПД. Использование природного газа в качестве топлива не является ограничивающим фактором по причине высокой экономической эффективности газовых турбин.

Важная задача гидроэнергетики Украины – выравнивание суточного графика нагрузок энергосистемы. Сегодня мощности гидроэнергетики недостаточно для устойчивой работы энергетики страны и, прежде всего, атомной энергетики. Несмотря на планы развития гидроэнергетики Украины, недостаток маневровых мощностей сохранится до 2030 г. Поэтому необходимы дополнительные источники маневровых мощностей, такие как энергетические газовые турбины.

Газотранспортная система

Газотранспортная система Украины является самой большой в Европе [3], ее пропускная способность составляет более 280 млрд. м³ газа в год, в том числе в Европу – около 180 млрд. м³. В 2011 г. в Европу было экспортировано 104 млрд. м³ газа, а в 2015 г. – только 59 млрд. м³, что связано с запуском двух ниток газопровода «Северный поток-1» пропускной способностью 55 млрд. м³ газа в год. В 2019 г. планируется запуск «Северного потока-2» такой же производительностью, что может существенно снизить поставки природного газа в Европу через Украину.

Сейчас обсуждается проект строительства двух ниток «Южного потока» производительностью 16 млрд. м³ в год каждая, одна из них предназначена для Турции, а другая – для европейских потребителей. Ввод в строй «Южного потока» в 2019 г. снизит транспорт газа че-

рез Украину: к 2020 г. он может упасть до 10...15 млрд. м³, а доходы от транзита – уменьшатся на 2 млрд. долл. США.

Другой важной проблемой газотранспортной системы Украины является устарелое оборудование. Для привода компрессоров используются устаревшие газотурбинные двигатели, средний коэффициент полезного действия которых составляет менее 30 % [3]. При норме замены более 20 единиц ежегодно, заменяются только 2-3, по этой причине ежегодный расход природного газа в качестве топлива для газовых турбин составляет 2...3 млрд. м³. Не проводятся работы по утилизации «выбросной» теплоты газовых турбин, технически возможный потенциал которой эквивалентен 2 ГВт. В ближайшие годы необходимо провести большие работы по модернизации морально и физически устаревших магистральных трубопроводов.

Один из важных показателей энергетической безопасности Украины транзит природного газа в Европу находится под серьезной угрозой. К 2019-2020 г.г. за счет строительства «обходных» газопроводов транзит газа через Украину может снизиться до 10...15 млрд. м³, а страна – потерять около 2 млрд. долл. США в год за счет транзита газа. В этом случае газотранспортная система Украины может оказаться в критическом состоянии.

Энергоэффективность и энергосбережение

Украина имеет один из самых высоких показателей потребления энергии на душу населения. При численности населения менее 1 % от мировой, она потребляет более 2 % мировых энергоресурсов (более 200 млн. тонн у.т. в год) и занимает 15 место среди крупнейших потребителей топливно-энергетических ресурсов. Сегодня Украина занимает первое место в Европе по энергозатратности валового продукта, которая в 3,5 раза выше, чем в промышленно развитых странах Европы и в 1,6 раза выше, чем в Беларуси [2, 4].

Наибольший потенциал экономии топлива сосредоточен в малой энергетике Украины, куда относятся промышленные ТЭЦ и котельные, коммунальная энергетика, промышленные печи, бытовые энергоустановки, автономные теплоцентрали. Они потребляют более 60 % всего топлива в топливно-энергетическом комплексе Украины.

В Украине эксплуатируются большое количество низкоэффективных котельных и автономных генераторов теплоты, которые сжигают газ и мазут. Удельный расход топлива на производство тепловой энергии в них очень высок, а средний КПД не превышает 75 %, что ниже технически допустимого уровня. Эти источники тепловой энергии являются также основными источниками загрязнения окружающей среды. Украине необходимо снизить энергоемкость национального продукта до среднемирового уровня. Для этого необходимо:

1. Провести коренную модернизацию малых котлов и теплогенераторов, более широко внедрять котлы с высокими показателями КПД.

2. Выполнить реконструкцию части котельных с

переводом их в более эффективные мини-ТЭЦ электрической мощностью до 50 МВт, что не требует крупных капиталовложений (1000...2000 долл. США на 1 кВт установленной мощности). Срок окупаемости таких установок составляет 3...5 лет, что в 2 раза меньше, чем в тепловой энергетике, а удельный расход топлива почти в 2 раза ниже, чем на мощных ТЭС.

3. Всемерно снижать потери энергоресурсов – тепловых потерь в теплотрассах при транспортировке тепловой энергии, электроэнергии в магистральных и распределительных электрических сетях.

4. Более широко использовать остаток «ночного провала» после ГАЭС (3...4 ГВт) для целей теплоснабжения. Для этого могут быть использованы мощные тепловые насосы, а также накопительные системы электроотопления, которые будут играть роль потребителей-регуляторов для улучшения качества работы электрических сетей Украины.

5. Более широко использовать местные виды топлива, шахтный метан, биогаз бытовых отходов, котлы на торфе и биомассе.

6. Существенно снизить тепловые потери в зданиях за счет термомодернизации и использования новых теплоизолирующих материалов для строительной индустрии.

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов является одной из главных проблем Украины. Энергоемкость внутреннего валового продукта Украины в 2...2,5 раза выше, чем в ведущих странах Европы. Большой потенциал экономии топлива сосредоточен в малой энергетике Украины, которая потребляет более 60 % всех топливно-энергетических ресурсов страны. Большие потери имеют место при транспортировке тепловой и электрической энергии, а также в жилищно-коммунальном хозяйстве Украины.

Выводы

- Энергетика Украины функционирует в сложных условиях, обусловленных нестабильной политической ситуацией в стране. Большая часть показателей энергетической безопасности страны находится на границе между опасным и критическим состоянием.

- Добыча угля – основного энергоносителя для электростанций Украины – в 2016 г. упала в 2 раза, проблемы в снабжении ТЭС Украины углем антрацитовой группы привели к кризисным явлениям в энергетике. Транзит природного газа в Европу существенно сократился и имеет устойчивую тенденцию к дальнейшему снижению, что может привести к деградации газотранспортной системы Украины.

- Тепловая энергетика Украины характеризуется низкими эксплуатационными характеристиками и значительными выбросами вредных продуктов в атмосферу. Около 85 % ТЭС Украины выработали физический ресурс и морально устарели, паузловая модернизация в тепловой энергетике может продлить жизнь тепловой энергетике еще на 15...20 лет, но не способствует ее технической модернизации.

- Атомные блоки Украины приближаются к концу проектного срока эксплуатации. Первостепенными задачами являются разработка научно-обоснованной программы продления срока эксплуатации атомных блоков на 15...20 лет и разработка программы строительства новых реакторов.

- Большие задачи стоят в области энергоэффективности и энергосбережения, прежде всего, в области малой энергетики Украины, которая потребляет более 60 % топливных ресурсов страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кваша І.М.* Стан енергетичної безпеки України (оцінка та методологія розрахунку). В сб. «Загрози енергетичній безпеці України в умовах посилення конкуренції на глобальному та регіональному ринках енергетичних ресурсів». Київ: 2012.

2. *Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С., Чернявський М.В., Топал О.І., Засядько Я.І.* Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України. Київ: Изд. ГНОЗИС, 2013. 319 с.

3. *Халатов А.А., Карп І.М., Куцан Ю.Г.* Енергетичне газотурбобудування: перспективи використання в енергетиці України. Вісник НАН України, 2015, №11.

4. *Халатов А.А.* Енергетика України: сучасний стан і найближчі перспективи. Вісник НАН України, 2016, №6.

THE ENERGY SAFETY OF UKRAINE: IS THERE A SAFETY MARGIN?

Khalatov A.A.

Institute of Engineering Thermophysics of the National
Academy of Sciences of Ukraine,
vul. Zhelyabova, 2a, Kiev, 03580, Ukraine

The energy safety of Ukraine is determined by several indicators, the most important of which are the energy intensity of gross domestic product, degree of country security with its own fuel and energy resources, wear of basic assets of the fuel and energy complex, transit of energy resources the country, investments in the fuel and energy complex of Ukraine, and some others. The paper considers the infrastructure of energy and power sector of Ukraine, which includes the fuel base of energy and power engineering, thermal and nuclear engineering, hydropower engineering, and natural gas pipeline network. It is shown most indicators of energy security of Ukraine are on the

border between its dangerous and critical state.

References 4.

Key words: energy safety, fuel base, thermal and nuclear power engineering, natural gas pipeline network, energy efficiency and energy safety.

1. *Kvasha I.M.* State of energy security of Ukraine (evaluation and methodology). Collection of papers «Threats of energy security of Ukraine in the face of increased competition in the global and regional markets for energy resources». Kyiv: 2012 [in Ukrainian].

2. *Volchyn I.A., Dunaevska N.I., Haponich L.S., Chernyavskyi M.V., Topal O.I., Zasiadko Ya.I.* Prospects for implementation of clean coal technologies in the energy sector of Ukraine. Kyiv: Gnozis, 2013, 319 p. [in Ukrainian].

3. *Khalatov A.A., Karp I.N., Kutsan Yu.G.* The power gas turbines: prospects of application in power engineering of Ukraine. Visnik NANU, 11, 2015 [in Ukrainian].

4. *Khalatov A.* Energy sector of Ukraine: modern state and nearest prospects. Visnik NANU, 6, 2016 [in Ukrainian].

Получено 21.03.2017

Received 21.03.2017

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ТЕПЛОНАСОСНІ ТЕХНОЛОГІЇ. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ

Сніжкін Ю.Ф., член – кореспондент НАН України

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

В роботі розглядаються питання стану, розвитку і впровадження теплонасосних технологій в Україні. Наведено приклади використання цих технологій як в світі, так і в Україні. Представлені різні схеми використання теплонасосних технологій в комунальному господарстві і промисловості. Показані можливі об'єми економії енергоресурсів при широкому впровадженні теплонасосних технологій.

В работе рассмотрены вопросы состояния, развития и внедрения теплонасосных технологий в Украине. Приведены примеры использования этих технологий как в мире, так и в Украине. Представлены различные схемы применения теплонасосных технологий в коммунальном хозяйстве и промышленности. Показаны возможные объемы экономии энергоресурсов при широком внедрении теплонасосных технологий.

In the article addresses issues the state, development and implementation of heat pump technology in Ukraine. Examples use of these technologies both in the world and in Ukraine. Presented various schemes using of heat pump technology in field of housing economy and industry. Shown volume are possible economy of power resources in a wide implementation of heat pump technology.

Бібл. 7, рис. 8.

Ключові слова: теплонасосні технології, енергоефективність, відновлювані джерела енергії, заміщення природного газу, сушка.

Вступ

Україні, яка відноситься до країн з обмеженими власними енергоресурсами і імпортує близько 90 % рідких та газоподібних енергоносіїв, притаманна надмірна енергоємність основних галузей промисловості (металургії, хімії, машинобудування, переробного та агропромислового комплексу, будіндустрії та комунального господарства).

Енергоємність внутрішнього валового продукту (ВВП) в Україні значно вища ніж в розвинутих країнах світу. Тому стратегічним напрямком розвитку країни є скорочення енергоємності ВВП у разі і досягнення рівня споживання енергоносіїв 0,3...0,5 кг у. п. на 1 гривню ВВП [1].

Досягти цього можливо тільки структурною перебудовою промисловості, удосконаленням керування виробництвом за рахунок автоматизації та оптимізації технологічних процесів, оновленням і модернізацією теплоенергетичного обладнання з метою зниження питомих витрат палива, більш широким використанням альтернативних видів палива та відновлюваних джерел енергії.

У 2013 р. Кабінет Міністрів України прийняв Державну програму модернізації систем теплопостачання на 2014-2015 р.р., головною метою якої було зниження обсягів використання природного газу майже на 4,2 млрд. м³ на рік. Програма мала два напрями: модернізація обладнання і застосування альтернативних видів палива та відновлюваних джерел енергії. Особливістю цієї програми є те, що вона створена на основі регіональних програм, які були розроблені кожною областю України, тобто там закладені реальні дані. Одним з аспектів цієї Програми було широке впровад-

ження теплових насосів (ТН) в системах теплозабезпечення.

Аналіз досліджень і публікацій

Аналіз представлених даних цієї програми показав (рис. 1), що шляхом модернізації обладнання можливо заощадити 2,131 млрд. м³ на рік природного газу, або 25,4 % річного споживання галузі. Найбільший показник економії дає заміна тепломереж – понад 1 млрд. м³ газу. Найменше – заміна котлів.

Використання альтернативних видів палива і відновлюваних джерел енергії заміщує 2,039 млрд. м³/рік газу, або 24,2 % його річного споживання в галузі. Найбільший показник заміщення газу дають теплові насоси – понад 0,9 млрд. м³/рік. Найменший – використання сонячної енергії.

Обсяг капіталовкладень на модернізацію обладнання становить 18,8 млрд. грн., або 68 % фінансування програми (рис. 2). Найбільші витрати припадають на заміну тепломереж – 10,53 млрд. грн. (56 % фінансів напрямку). В модернізацію котлів закладено найменше капіталовкладень – 4 % всіх капіталовкладень в напрям. По другому напрямку капіталовкладення склали 9,06 млрд. грн., або 32% фінансування всієї програми. Найбільші капіталовкладення припадають на роботи по теплопостачанню за рахунок використання електричної енергії – 2,8 млрд. грн. та теплових насосів – 2,7 млрд. грн. (30 % фінансів напрямку). Найменше капіталовкладень припадає на переобладнання котельень на тверде паливо – 8 % від капіталовкладень напрямку.

Підрахунки ефективності капіталовкладень показують (рис. 3), що найменша вартість зекономленого газу буде при впровадженні теплоутилізаторів – 150 доларів

США за 1000 м³ газу, а найбільша – при впровадженні блочно-модульних котельень – 8325 доларів США за 1000 м³ газу. При заміні тепломереж вартість зекономленого газу становить 1300 доларів США за 1000 м³ газу.

По другому напрямку найменша вартість заміщеного газу досягається при впровадженні котлів на біопаливі – 225 доларів США за 1000 м³ газу і тепло-

вих насосів – 362 доларів США за 1000 м³ газу. Найбільша – при використанні сонячної енергії – 812 доларів США за 1000 м³ газу.

Таким чином аналіз Державної програми показує, що найбільш ефективним засобом заощадження природного газу є впровадження теплових насосів в системи теплопостачання.

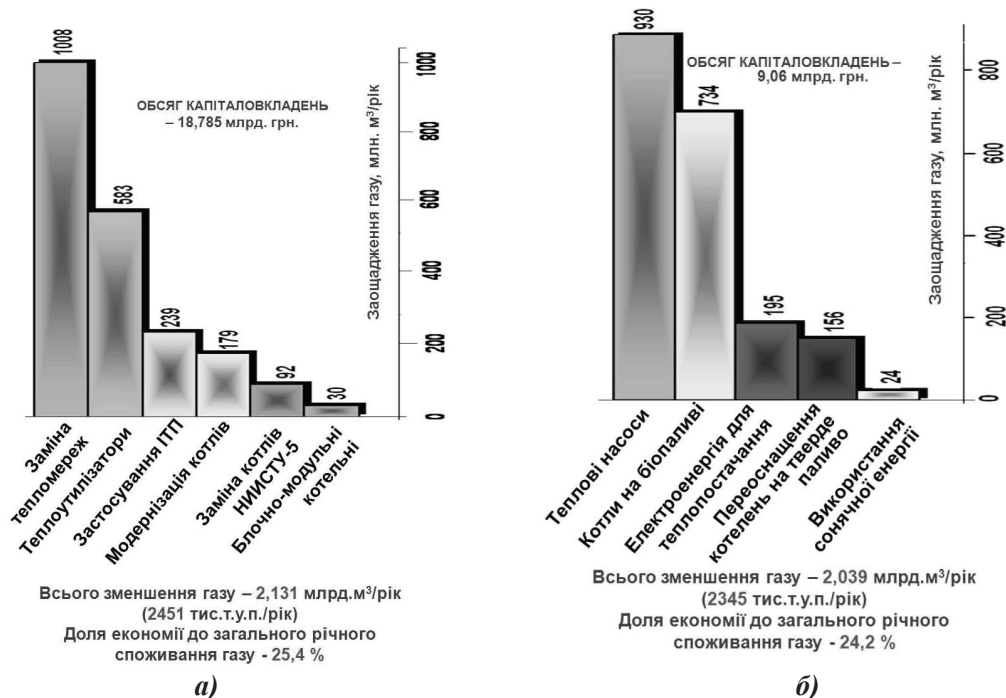


Рис. 1. Дані програми модернізації систем теплопостачання України: а – модернізація обладнання; б – альтернативні види палива.

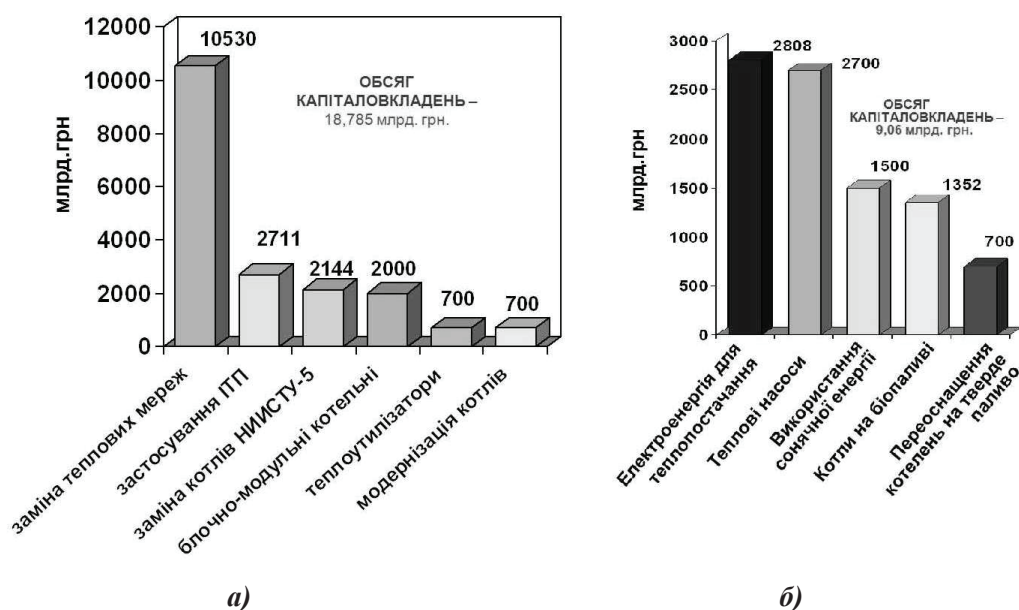


Рис. 2. Капіталовкладення при впровадженні заходів програми: а – на модернізацію обладнання; б – на заміщення газу альтернативними видами палива.

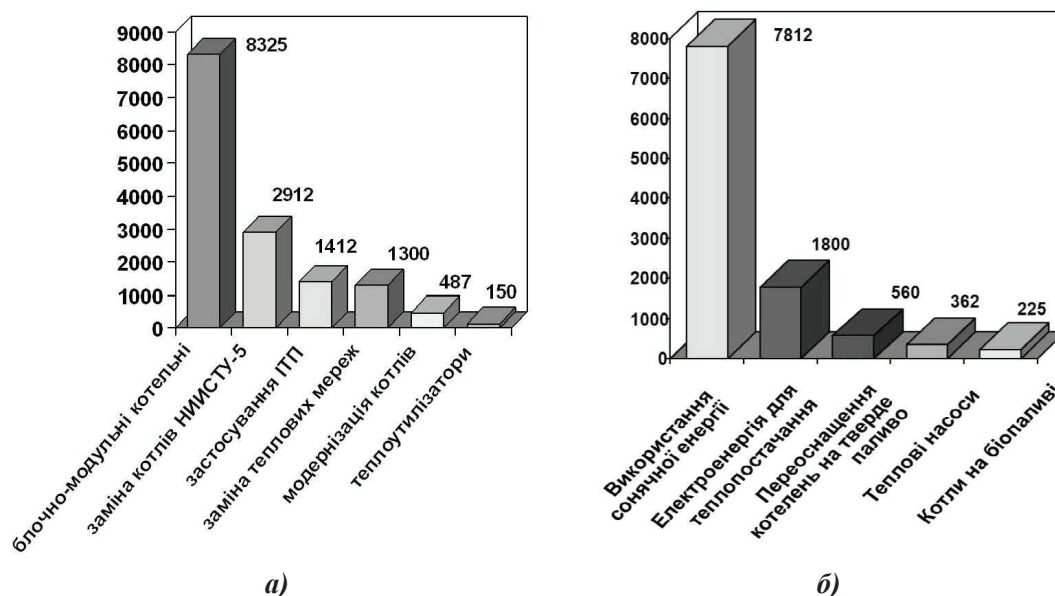


Рис. 3. Капіталовкладення на 1000 м³ зекономленого газу при впровадженні: а – модернізації обладнання; б – заміщення газу альтернативними видами палива.



Рис. 4. Теплонасосна система гарячого водопостачання потужністю 1,5 кВт у м. Краматорськ.

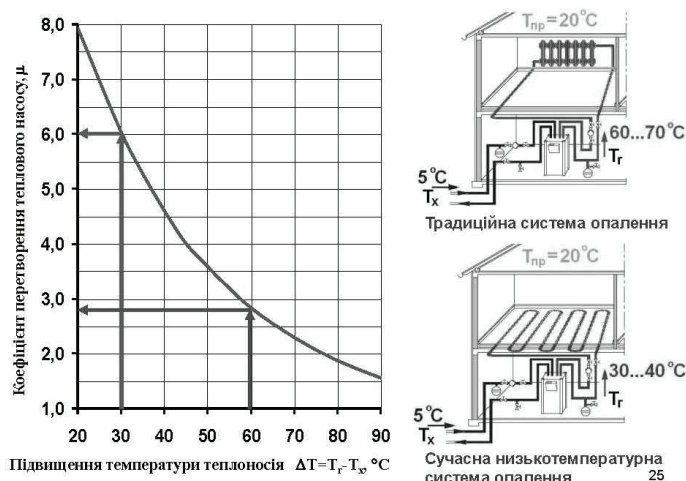


Рис. 5. Ефективність теплових насосів в різних системах опалення.

Отримані результати підтверджуються і світовими даними по широкому використанню ТН. Наприклад, у Швеції за допомогою теплових насосів виробляється більше 50 % тепла для потреб опалення і гарячого водопостачання, причому собівартість виробленої при цьому теплоти є на 20% нижчою у порівнянні з її виробництвом в традиційних газових котельнях. За прогнозами Світового енергетичного комітету, до 2020 р. частка теплонасосних установок у теплопостачанні зросте до 75 % [2]. Найбільшою теплонасосною системою теплопостачання є Стокгольмська установка потужністю 320 МВт. Вона розміщена на причалених до берега баржах і використовує як низькотемпературне джерело – воду Балтійського моря з температурою 2...4 °С. Високі темпи впровадження ТН сьогодні відмічаються у всьому світі.

Які ж джерела низькопотенційної енергії можуть бути перспективними для України? На наш погляд, майже всі. Однак у великих містах найбільш ефективним є використання теплоти стічних вод. Економічно доцільний потенціал теплоти стічних вод в Україні становить понад 1,5 млн. т у. п. на рік [3]. За нашими оцінками, при такому використанні ТН можна виробляти теплової енергії більш як 2 млн. т у. п. на рік, що дозволить замінити 2,2 млрд. м³ газу.

Об'єм каналізаційних стоків, що виробляються в м. Києві, практично не змінюється протягом року і складає 1,4 млн. м³ на добу. Температура стічних вод нижча температури зовнішнього повітря в літній період і вища в зимовий. Так в січні вона складає +18...+20 °С. За оцінками фахівців в міській комунікації разом зі стічними водами скидається близько 40 % використаного тепла. Це робить їх ідеальним джерелом низькопотенційного тепла для використання в ТН. Крім того, значна частина населення м. Києва забезпечується артезіанською водою, яка має в середньому температуру +12...+14 °С, що також являє собою перспективне джерело низькопотенційного тепла для ТН.

Інститут технічної теплофізики НАН України вперше в Україні розробив і впровадив в м. Краматорську теплонасосну систему гарячого водопостачання потужністю 1,5 МВт, у якій джерелом низькопотенційної енергії є каналізаційні стічні води (рис. 4). Ця теплонасосна установка забезпечує гарячою водою 4400 споживачів і дає змогу економити 1,56 млн. м³ газу на рік.

Однак парадокс полягає в тому, що в умовах чинних пільгових тарифів на теплову енергію для населення розрахунковий термін окупності такої теплонасосної системи становить 19,5 років, а з урахуванням ринкової ціни зекономленого газу – лише 2,5 роки.

Економічно доцільний енергетичний потенціал ґрунту і ґрунтових вод в Україні оцінюється у понад 1,2 млн. т у. п. на рік [3]. Технічно можливі обсяги використання цієї енергії для теплозабезпечення за допомогою теплових насосів становлять 1,75 млн. т у. п. на рік, що дозволить заощадити близько 2 млрд. м³ газу. Інститут розробив компресійний тепловий насос типу «вода-вода» потужністю 50 і 100 кВт. Цю розробку впровадже-

но в ДП НВК «Прогрес» у м. Ніжин, де в якості джерела енергії використовується низькопотенційна теплота артезіанської води.

Технічно-доцільний енергетичний потенціал повітря становить в Україні близько 3,5 млн. т у. п. на рік [4]. На сьогодні це є найефективнішим джерелом низькопотенційної енергії. За даними Європейської асоціації ТН (ЕНРА), у 2008 р. частка ТН типу «повітря-вода» для опалення в загальному обсязі продажів у восьми європейських країнах (Австрія, Італія, Німеччина, Норвегія, Фінляндія, Франція, Швейцарія, Швеція) становила 34,9 %, що майже в 4 рази перевищує продажі ґрунтових ТН. Це пояснюється насамперед тим, що технічні характеристики насосів типу «повітря-вода» є досить високими (шведські ТН фірми «Octorus» гарантовано працюють навіть при -40 °С), а капітальні витрати на їх впровадження є суттєво меншими у порівнянні з ґрунтовими [6].

В останні роки Інститут впровадив 4 теплонасосні установки потужністю від 0,6 до 1,5 МВт, розробив 17 техніко-економічних обґрунтувань на опалення та гаряче водопостачання різного роду приміщень та будівель. Термін окупності об'єктів, якщо розраховувати його за економією природного газу, становить 2...4 роки.

Ефективність використання ТН у різних системах опалення наведено на рис. 5. У будівлях, обладнаних традиційними батареями, коефіцієнт перетворення енергії теплонасоса не перевищує значення 3,0, а в разі використання низькотемпературної системи опалення типу «тепла підлога» він зростає більш ніж удвічі.

Для широкого впровадження теплонасосних установок необхідна політика їх державного стимулювання. Так, у країнах ЄС за останні роки прийнято цілу низку законів, що сприяють розвитку цього напрямку [5]. До них належать:

1. Диференціація субсидій за такими критеріями: нова чи стара будівля; житлові чи нежитлові приміщення; ґрунтовий чи повітряний ТН; величина коефіцієнта перетворення енергії при впровадженні теплового насосу.

2. Закон щодо нових будинків з обов'язковим забезпеченням 50 % їх потреб у тепловій енергії за рахунок альтернативних джерел енергії (Німеччина).

3. Надання субсидії при встановленні ТН: в новому будинку – 10 € на 1 м² житлової площі (максимум 2000 €), відшкодування 10 % інвестиційних витрат; у будинку після реконструкції – 30€ на 1 м² житлової площі (максимум 3000 €), відшкодування до 15 % інвестиційних витрат (Німеччина).

4. Субсидія в розмірі 30 % витрат на встановлення (постачання і монтаж) ТН (максимум 3300 €) за умови, що споживання електроенергії зросте не більш як на 35 % (Швеція).

5. У новобудовах надання субсидії 2200 €, якщо сезонний коефіцієнт перетворення енергії $\mu \geq 4,5$ (4,3 з підігріванням води), і 1500 €, якщо $\mu \geq 3,8$ (3,6 з підігріванням води). У будівлях після реконструкції субсидія збільшується на 220 €, але лише у разі заміни застарілих котлів, віком понад 15 років (Австрія).

6. Податкові пільги у розмірі 25...50 % при

встановленні ТН (Франція).

Ефективність використання ТН великою мірою залежить від співвідношення цін на електричну та теплову енергію. Порівняння вартості енергетичної складової теплоти, виробленої за допомогою компресійної теплонасосної установки з коефіцієнтом перетворення енергії 3,0...4,5 та при спалюванні газу в традиційній котельні, показує, що в разі ціни на газ понад 5 тис. грн. за 1 тис. м³, а на електроенергію 1,0...1,22 грн. за кВт·год альтернативи використанню ТН немає (рис. 6).

З огляду на перспективи впровадження ТН у системах теплозабезпечення та гарячого водопостачання, розрахунки показують, що технічно досяжним потенціалом енергозбереження може становити 26,5 млн. т у. п. на рік, що в свою чергу дозволить заощадити до 20 млрд. м³ газу (рис. 7).

Як відомо, для одержання 1 кВт·год теплової енергії за допомогою теплового насоса потрібно витратити 0,3...0,4 кВт·год електричної енергії. Виходить, що для отримання теплоти, еквівалентної 20 млрд. м³ газу (148,8 млрд. кВт·год в електричному еквіваленті), необхідно витратити 51,3 млрд. кВт·год. електричної енергії, що становить 26,5 % електроенергії, виробленої в Україні в 2013 році. Населення й комунально-побутові споживачі в 2013 р. спожили 40,7 % від усієї виробленої електроенергії. Отже, використання цього потенціалу в повному обсязі в Україні теоретично можливе, а практично – на сьогодні навряд чи може бути досягнуто.

Як же вирішити цю проблему? Одним із шляхів може бути вирівнювання нічного «провалу» в електрозабезпеченні для виробництва й акумулювання теплової енергії з її використанням у денний час за допомогою теплонасосних установок (8000 МВт за добу взимку і 5000 МВт – влітку). Найефективніше теплові насоси працюють з акумуляторами теплоти й двотарифними лічильниками, використовуючи електроенергію в період нічного «провалу» добового графіка електронавантаження в системі. При цьому є вигода як для користувачів теплоти з ТН через зниження плати за

електроенергію за нічним тарифом, так і для енергосистеми. Завдяки акумулюванню теплоти собівартість 1 Гкал теплоти знижується на 15...20 %.

Крім того, Україна має резерв потужностей з виробництва електроенергії. За розрахунками фахівців ІТТФ НАН України, за допомогою вдосконалення роботи енергосистеми України і «форсування» атомної та теплової енергії можна додатково отримати 21,6 млрд. кВт·год. електроенергії. Якщо цю електроенергію використати на привод ТН, то ми одержимо 62,6 млрд. кВт·год теплоти, що відповідає заміщенню 8,4 млрд. м³ газу. Це є технічно досяжним потенціалом енергозбереження в Україні при впровадженні ТН.

Державною програмою модернізації систем теплопостачання заплановано впровадження в Україні 3000 ТН, на які передбачено асигнування в обсязі, еквівалентному \$ 337,5 млн. Але в Україні відсутнє промислове виробництво теплових насосів. Маркетингові дослідження показали, що по системі ціна-якість найбільш ефективно використовувати теплові насоси китайського виробництва. Тому інститут співпрацює з партнерами КНР, які випускають промислові теплові насоси. Потужність таких ТН 0,5...8,0 МВт з температурою теплоносія +70...+85 °С. Пітома вартість таких установок – біля 200 доларів США за 1 кВт встановленої потужності, що є найнижчою з існуючих ринкових цін ТН.

У разі використання китайських ТН тільки на опаленні можливо виробити кількість теплоти, достатньої для заміщення 1,35 млрд. м³ газу за ціною 250 дол. США за 1000 м³ газу, або 2,65 млрд. м³ газу за ціною 127 доларів за 1000 м³ газу коли буде тільки гаряче водопостачання. Необхідна при цьому кількість електроенергії не перевищує 5,6 млрд. кВт·год на рік.

За оперативними даними НАК «Нафтогаз України» та ПАТ «Укртрансгаз» (без врахування зони АТО) в період 2013-2014 р.р. теплокомуненерго і бюджетні установи скоротили споживання газу за опалювальний

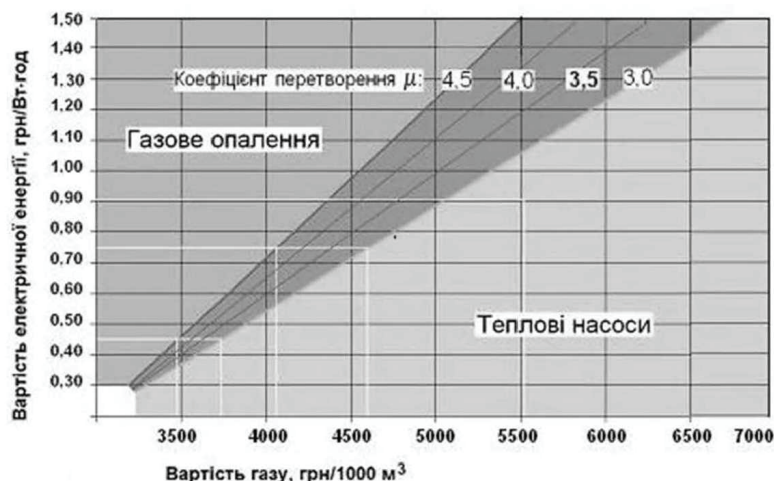


Рис. 6. Порівняльна вартість енергетичної складової теплоти, виробленої за допомогою компресійного теплового насоса та при спалюванні газу в котельні.

період на 2,1 млрд. м³ газу. Тому можна стверджувати, що Державна програма модернізації систем теплопостачання виконана на 50 %.

Сьогодні в світі 8...10 % виробленої енергії витрачається на процеси сушіння, під час яких випаровується понад 25 млн. т вологи, що відноситься до парникових газів. Застосування ТН у процесах сушіння є досить ефективним. Як уже зазначалося, при використанні ТН для опалення чи гарячого водопостачання необхідно знайти джерело низькопотенційної енергії. У процесах сушіння воно є в самій сушарці. Це – відпрацьований теплоносі, що традиційно викидається в атмосферу. Тобто використання теплонасосних установок у процесах сушіння – майже ідеальний варіант використання відпрацьованого в технологічному процесі сушіння теплоносія. За новою схемою відпрацьований теплоносі не викидається в атмосферу, а направляється у випарник з більш низькою температурою. При цьому його температура знижується, волога конденсується на поверхні випарника, віддаючи енергію конденсації робочому тілу. Сам теплоносі осушується. Далі він,

проходячи через конденсатор, підвищує свою температуру і, суттєво осушений, знову подається у сушарку. При такій схемі волога не потрапляє в навколишнє середовище, а витрати енергії на процес сушіння суттєво знижуються у порівнянні з традиційними сушарками. У деяких випадках ці витрати становлять величину навіть меншу за теоретичну, необхідну для випаровування вологи з відкритої поверхні.

Вперше в Україні в ІТТФ НАН України розроблено зерносушарку для насінневого зерна з використанням теплонасосної технології. Витрати енергії на випаровування вологи в ній становлять 0,6...0,8 кВт·год/л. Схожість зерна після сушіння – 100 %. Сушарку впроваджено в МТС у Вінницькій області [7].

Інститут також розробив і впровадив у В'єтнамі технологічну лінію виробництва харчових порошків з тропічних фруктів (рис. 8). У цій лінії використано чотиризонну тунельну сушарку з теплонасосною установкою. Це дозволило вперше в світі отримати натуральні харчові порошки з бананів та ананасів в умовах високої вологості тропічного клімату.

Джерело низькопотенційної енергії	Потенціал енергозбереження, млн т. у. п. на рік		Галузь застосування	Типи теплових насосів	Оптиміальні одинична потужність, кВт	Площа, яка опалюється однією обладнання, тис. м ²	Термін окупності, рік сезон, експл., ціловісн.
	Загальний	Економічно досяжний до 2020 р.					
 Водобігові теплі в енергетиці і промисловості	25,0	2,5	Комунальне житло, промислові об'єкти	компресійний, абсорбційний	5-10 ³	50	$\frac{5-8}{3-5}$
 Геотермальна енергія	12,0	9,3		компресійний, абсорбційний	200-1000	2-10	$\frac{5-8}{3-5}$
 Стічна вода	8,5	1,6		компресійний, абсорбційний	100-1000	10-50	3-4,5
 Шахтна вода	1,4	0,8			100-1000	10-50	3-4,5
 Верхній шар грунту	9,0	1,1	Індивідуальне і комунальне житло	компресійний	5-100	0,05-1,0	$\frac{4-5}{2-3}$
 Тепло відпрацьов. водобігач	14,0	5,0			10-100	0,1-1,0	$\frac{4-5}{2-3}$
 Вентиляційні потоки	0,8	0,25		компресійний	5-80	0,05-0,8	$\frac{2-3}{1,5-2}$
 Сонячна енергія	необмеж.	6,0		компресійний	5-80	0,05-0,2	$\frac{5-8}{3-4}$
Всього:		26,55	Перспективи заощадження природного газу – 20 млрд. м³				

Рис. 7. Порівняльна вартість енергетичної складової теплоти, виробленої за допомогою компресійного теплового насосу та при спалюванні природного газу в котельні.



Рис. 8. Технологічна лінія виробництва харчових порошків з тропічних фруктів.

Створена в Інституті камерна теплонасосна сушарка для зневоднення харчових продуктів дає змогу отримувати високоякісну термолабільну харчову сировину. За допомогою цієї сушарки фахівці ІТТФ НАН України розробили близько 30 видів сухих пайків для гарячого харчування військовослужбовців, які були успішно апробовані в бойових умовах АТО.

Потенціал енергозбереження в процесах сушіння в різних галузях промисловості України оцінюється в 1,6...2,1 млн. т у.п. на рік. Найбільшим він є в процесі сушіння будівельних матеріалів, вугілля, зерна і пиломатеріалів. Використання ТН у цих технологічних процесах може заощадити майже 1 млрд. м³ газу.

Висновки

- Загальний потенціал енергозбереження в Україні від впровадження теплонасосних технологій – 26 млн. т у.п. на рік, що дозволяє заощадити близько 20 млрд. м³ газу. Технічно досяжний потенціал енергозбереження – біля 11 млн. т у.п., що дорівнює понад 8,4 млрд. м³ газу на рік, економічно досяжний – біля 6,5 млн. т у.п., що еквівалентно 5 млрд. м³ газу.

- Ефективність впровадження теплотехнологій необхідно оцінювати не за тарифами на теплову енергію, а за обсягами економії природного газу.

- Варто надавати преференції покупцям тепло-

вих насосів (часткова грошова компенсація державою, пільговий кредит, відшкодування процентної ставки за кредитом тощо).

- Доцільно розробити програму організації виробництва вітчизняних теплових насосів.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Энергоэффективность как ресурс инновационного развития*: Национальный доклад о состоянии и перспективах реализации государственной политики энергоэффективности в 2008 году. К.: НАЕР, 2009.
2. *Екопортал* www.envizonments.land-ecology.com.ua
3. *Атлас энергетического потенциала возобновляемых и нетрадиционных источников*. К., 2005.
4. *Кудря С.А.* Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебн. / Кудря С.А. – К.: НТУУ «КПИ», 2012. – 492 с.
5. *Рынок тепловых насосов в ЕС*. Холод. 2010. №2. С.14-19
6. *Шведские тепловые насосы OCTOPUS* www.octopus.ua
7. *Снежкин Ю.Ф., Петрова Ж.А., Пазюк В.М.* Энергоэффективные теплотехнологии производства функциональных пищевых порошков. Монография. – Винница: «ВНАУ», 2016. – 456 с.

ENERGY EFFICIENT HEAT PUMP TECHNOLOGY. STATUS AND PROSPECTS OF THEIR INTRODUCTION IN UKRAINE

Sniezhkin Yu.F.

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

In the article addresses issues the state, development and implementation of heat pump technology in Ukraine. Examples use of these technologies both in the world and in Ukraine. Presented various schemes using of heat pump technology in field of housing economy and industry. Shown volume are possible economy of power resources in a wide implementation of heat pump technology.

1. *Energy efficiency as a resource innovative*

development. http://esco.co.ua/journal/2012_6/art356.pdf

2. *Ecoportal* www.envizonments.land-ecology.com.ua

3. *Atlas of the Energy Potential of Renewable and Alternative Sources*. (Kyiv, 2005). http://www.intelcenter.com.ua/rus/Cibrary/atlas_alten_ua.htm.

4. *Kudria S.O.* Alternative and renewable energy sources: textbook/ S.O. Kudria. – K.: NTUU "KPI", 2012. – 492 p.

5. *Heat pumps market in the EU*. Khold.2010.2:14-19

6. *Swedish Heat Pumps OCTOPUS*. www.octopus.ua

7. *Sniezhkin Yu.F., Petrova Zh.O., Paziuk V.M.* Energy efficient heat technology of production functional food powders: monograph – Vinnytsia: "VNAU", 2016. – 456 p.

Получено 22.03.2017

Received 22.03.2017

МОНІТОРИНГ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Бабак В.П., член-кореспондент НАН України

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

Розглянуто засади створення і практичного використання мобільних інформаційно-вимірювальних систем моніторингу характеристик довкілля об'єктів теплоенергетики та можливості використання з цією метою безпілотних літальних апаратів.

Рассмотрены основы создания и практического использования мобильных информационно-измерительных систем мониторинга объектов теплоэнергетики и возможность использования с этой целью беспилотных летательных аппаратов.

Considered principles of creation and practical use of mobile information and measurement systems to monitor environmental characteristics of thermal power facilities and the possibility of using this purpose unmanned aerial vehicles.

Бібл. 6, рис. 7.

Ключові слова: моніторинг технічного стану, об'єкти теплоенергетики, безпілотні літальні апарати, інформаційно-вимірювальні системи.

Вступ

Важливою складовою комплексної проблеми забезпечення енергетичної стійкості і незалежності України є організація постійного моніторингу об'єктів теплоенергетики. До числа останніх належать теплові електростанції (ТЕС) та теплові мережі. Як відомо, функціонування значної частини потужних теплогенеруючих об'єктів супроводжується викидом в атмосферу шкідливих речовин та випромінювань, а робота теплових мереж – зміною температурних полів середовища. Тому концентрація та рівень шкідливих домішок та випромінювань в атмосфері в околі ТЕС і конфігурація теплових полів теплотрас є зручними інтегральними характеристиками, за якими можна опосередковано і дистанційно виконати оцінювання технічного стану та режимів роботи об'єктів теплоенергетики, виявити небезпечні зміни в їх роботі на ранніх стадіях розвитку аварійних ситуацій. Отримання цих характеристик ускладнено такими особливостями об'єктів як їх розгалуженість у просторі на десятки і сотні кілометрів, розташування у важкодоступних місцях, існування кінцевої ймовірності виникнення техногенної небезпеки, що передбачає можливість моніторингу в умовах значного перевищення гранично допустимих для людини норм і доз шкідливих речовин і випромінювань.

До теперішнього часу залишаються недостатньо розробленими теоретичні та методологічні основи проектування і практичного використання мобільних інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) контролю

характеристик довкілля об'єктів теплоенергетики. В той же час результати моніторингу довкілля об'єктів енергетики у передових країнах світу [1-3] показали особливу актуальність і необхідність оперативного дистанційного контролю шкідливих домішок в атмосфері в околі ТЕС, дистанційного контролю стану теплотрас тощо. Нові можливості розв'язання цих завдань з'явилась із початком використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Створення та практичне застосування мобільних ІВС для дистанційного контролю на базі БПЛА забезпечить використання можливостей сучасних безлюдних технологій контролю та вимірювань в автоматизованому режимі, функціонування систем у важкодоступних місцях та за умов техногенної небезпеки, багатофункціональність (адаптацію) призначення за рахунок зміни модулів сенсорних підсистем, проведення динамічних вимірювань у 3D просторових координатах [3,4].

Результати досліджень

В залежності від характеристик (швидкість і напрямок вітру, атмосферний тиск, температура та ін.) метеорологічних полів, а також від кількості, об'єму та наявності тих чи інших забруднюючих речовин, що надходять з ТЕС, здійснюється їх перенесення у певних напрямках та на певні відстані з подальшим опаданням на зелені насадження та поверхню землі (грунт, водна поверхня) шкідливих та небезпечних речовин. Схематично цей процес відображено на рис. 1.



Рис. 1. Схема процесу розповсюдження забруднень.

Ступінь забруднення площин ґрунту, зелених насаджень або власне атмосфери залежить від режиму роботи (штатний, аварійний або катастрофа) ТЕС. Найбільший питомий викид на одиницю виробленої електроенергії дає вугільна станція. У вугіллі містяться природні радіоактивні речовини – торій, два довгоживучі ізотопи урану, продукти їх розпаду (радій, радон і полоній), а також довгоживучий радіоактивний ізотоп калію – калій-40. В процесі спалювання вугілля вони практично повністю потрапляють у зовнішнє середовище. При цьому питома радіаційна активність викидів вугільних ТЕС у 5...10 разів вище, ніж на АЕС. Значна частка природних радіонуклідів, що містяться у вугіллі, скупчується в шлакових відвалах ТЕС і потрапляє в організм людини по харчових ланцюжках після розчинення водою. У тонні золи на ТЕС міститься до 100 г радіоактивних речовин. Викиди ТЕС містять, головним чином, елементи, які беруть активну участь у життєвому циклі. Концентрація багатьох специфічних речовин, яким притаманна висока біологічна небезпека, у викидах ТЕС не нормується.

В процесі спалювання вугілля, крім золи і сажі, утворюються двоокис вуглецю, що створює парниковий ефект; токсичні гази (оксиди вуглецю, сірки, азоту та ванадію), що викликають кислотні дощі і кислотні отруєння; складні поліциклічні ароматичні вуглеводи канцерогенного впливу (бензапірен і формальдегід); пари соляної та плавикової кислот; токсичні метали (миш'як, кадмій, ртуть, свинець, талій, хром, натрій, нікель, ванадій, бор, мідь, залізо, марганець, молібден, селен, цинк, сурма, ко-балт, берилій), які можуть викликати в 1000 разів більше смертей, ніж ядерні відходи.

Основним джерелом забруднення довкілля ТЕС під час роботи як у штатному, так і в аварійному режимах є топково-котельне обладнання (пальники, камери згоряння, котли та ін.). Їх робота супроводжується викидом в атмосферу продуктів згоряння органічного палива (вугілля, мазут, газ). Негативний вплив на довкілля чинить також і викид відпрацьованого пару, частина якого потрапляє у довкілля після роботи парових турбін і охолодження у градирнях.

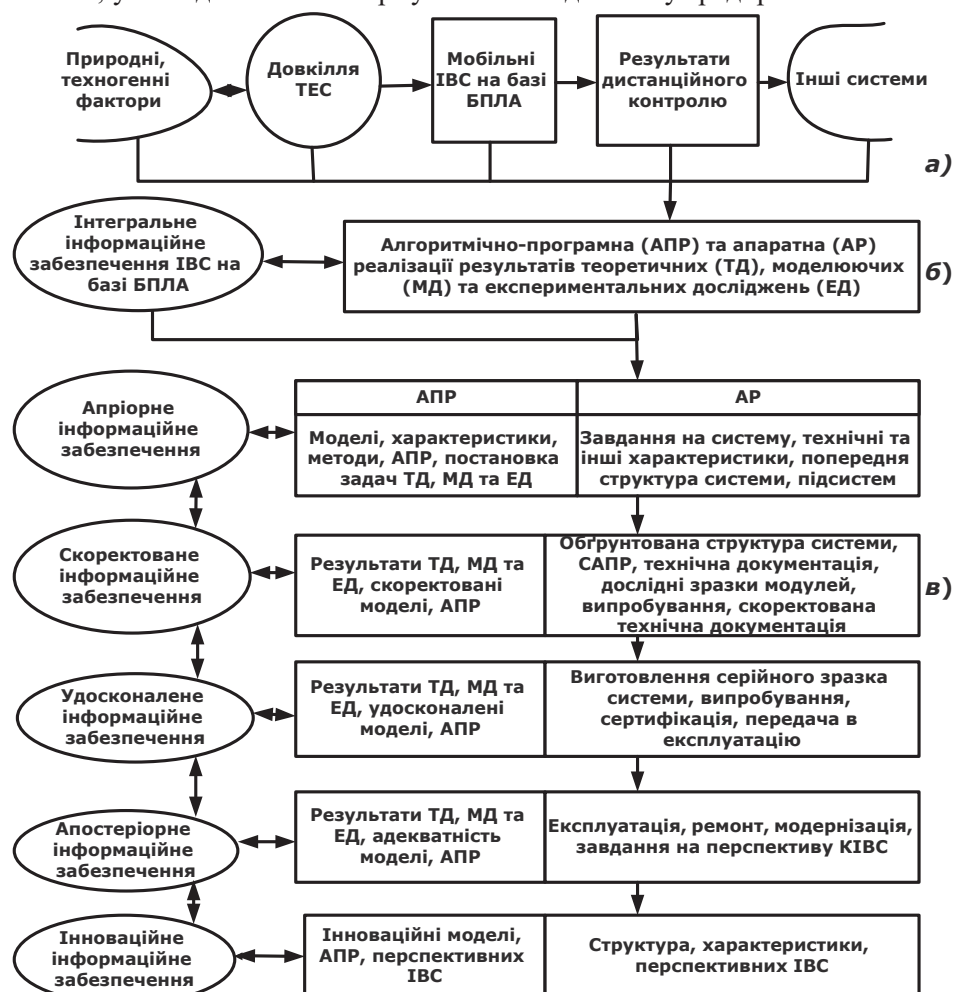


Рис. 2. Структура етапів створення та використання інформаційного забезпечення при розробленні та експлуатації мобільних ІВС на базі БПЛА:
а) об'єкти та предмети дослідження; б) предмети розроблення;
в) етапи створення та використання інформаційного забезпечення.

Крім перелічених вище складових, що забруднюють довкілля в процесі роботи обладнання ТЕС, виникають локальні шкідливі складові, які утворюються внаслідок роботи обладнання для підготовки палива (вугілля) та хімічного очищення води. Це, перш за все, шумовібраційні та хімічні складові. В результаті роботи генераторів, трансформаторів, іншого перетворюючого та розподільчого обладнання виникають також окремі локальні шкідливі складові, які пов'язані з електромагнітними, шумовібраційними та тепловими процесами.

При виникненні аварійних ситуацій (пошкодження топково-котельного обладнання, системи димових фільтрів та ін.) можливе різке посилення забруднюючого впливу на довкілля продуктами згоряння ТЕС. Локальне забруднення виникає також внаслідок аварій потужних трансформаторів, що може супроводжуватись викидом трансформаторного мастила і пожежами.

Використання спеціалізованих ІВС додатково до існуючих методів і засобів моніторингу довкілля і обладнання ТЕС дає можливість (у тому числі і з використанням БПЛА) здійснювати дистанційний багатофункціональний моніторинг, який дозволяє:

- вимірювати ступінь концентрації небезпечних продуктів згоряння (СО, частки золи, диму та ін.); ви-

користання БПЛА забезпечує одержання цих даних дистанційно, в різних шарах атмосфери довкілля ТЕС;

- вимірювати температурний стан електротехнічного обладнання ТЕС та магістральних ЛЕП, що призначені для передавання виробленої електроенергії;

- контролювати температурний стан магістральних трубопроводів, що призначені для передавання виробленої теплової енергії.

Багатофункціональність сучасних засобів дистанційного моніторингу об'єктів ТЕС передбачає розширення їх можливостей за рахунок використання відповідних інформаційно-вимірювальних засобів (відеоспостереження довкілля та обладнання ТЕС, вимірювання та аналіз складу речовин у довкіллі, тепловізійний контроль ЛЕП та трубопроводів та ін.).

Для реалізації процесу моніторингу в мобільних ІВС використовуються як апаратно-програмні системи різного призначення, засоби спостереження, так і інформаційні технології, транспортні засоби, в тому числі БПЛА та відповідне інформаційне забезпечення. Інформаційне забезпечення є інтегральним продуктом значної кількості компонент, складових так званого м'якого обладнання досліджуваних систем, об'єктів, комплексів [5].

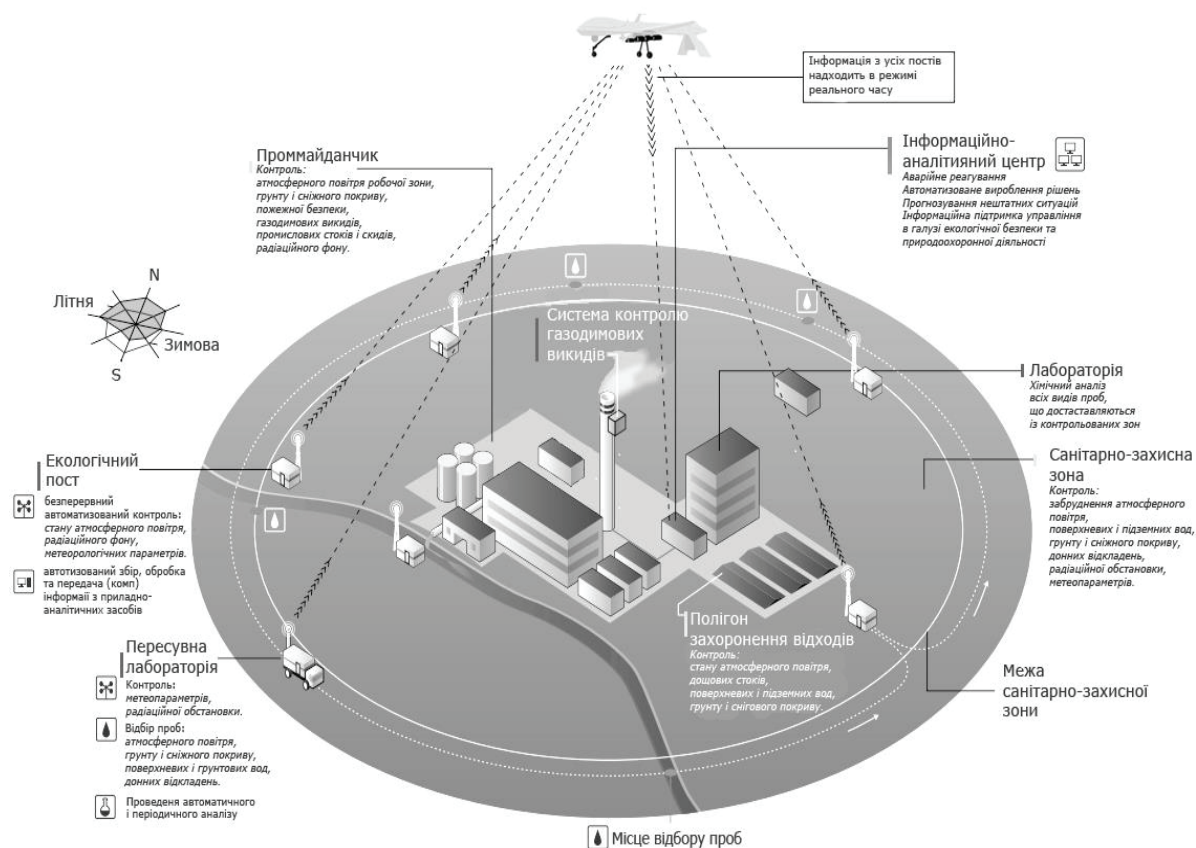


Рис. 3. Узагальнена схема функціонування інформаційно-аналітичної системи моніторингу ТЕС.

Вага і значущість кожного з цих видів інформаційного забезпечення різна на різних етапах життєвого циклу систем моніторингу. Нормативно-технічне і проектно-технологічне інформаційне забезпечення складається із загальноприйнятої нормативної бази, стандартів, мето-дичних рекомендацій, існуючих баз даних, санітарних норм. Їх основна функція полягає у інформаційній підтримці існуючих систем, які реалізують відомі, загальноприйняті принципи і методи моніторингу. В певному сенсі їх можна розглядати як базову складову інформаційного забезпечення.

Поетапне створення та використання інформаційного забезпечення ІВС на базі БПЛА схематично зображено на рис. 2.

В зоні розташування ТЕС (рис. 3) за допомогою стаціонарних та пересувних екологічних лабораторій здійснюється періодичний забір проб повітря, води та ґрунту з метою контролю їх забруднення, а також поверхневих і підземних вод, дощових стоків, снігового покриву, донних відкладень водоєм, радіаційного стану, метеопараметрів, газодимових викидів, промислових стоків і скидів, стану пожежної безпеки тощо. Вся інформація збирається з розгалуженої мережі екологічних постів, лабораторій та різних технологічних сегментів ТЕС, передається за допомогою дротової чи бездротової системи передачі даних і обробляється в

інформаційно-аналітичному центрі, який забезпечує інформаційну підтримку управлінських рішень, енергозберігаючих режимів експлуатації об'єктів енергетики, прогнозування та аварійного реагування на нештатні ситуації.

Оскільки аварійні ситуації виникають несподівано, доцільно в складі таких систем використовувати БПЛА, що не вимагають для старту і посадки підготовленої площадки, мають мінімальний час розгортання та помірні техніко-економічні показники. БПЛА повинен мати можливість дистанційного керування, а також виконувати політ в автоматичному режимі (наприклад, під управлінням автопілоту). З урахуванням корисного навантаження (відеоканал фронтального огляду, автопілот, пристрій відбору проб, вимірювач радіаційного фону тощо) злітна вага повинна становити 2...4 кг. Прийнятим є БПЛА літакового типу зі штовхаючим гвинтом на електричній тязі. Компонівка під різні види корисного навантаження призводить до необхідності в кожному окремому випадку адаптувати їх конструкцію до конкретного завдання.

Побудова ІВС на основі БПЛА дозволяє, з використанням систем GPS, здійснити прив'язку результатів вимірювань у будь-якій точці підконтрольного інформаційного простору до їх географічних координат [3].

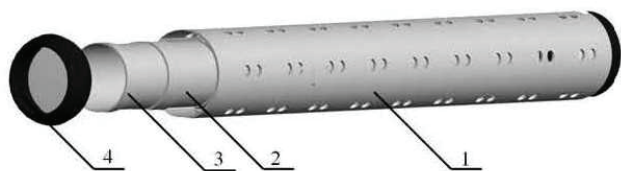


Рис. 4. Схема ФЕП, де 1 – зовнішній корпус (ежектор), 2 – внутрішній сітчастий корпус, 3 – фільтр, 4 – вхідний фланець.

В цілому ІВС на базі БПЛА суттєво доповнюють системи контролю та моніторингу об'єктів енергетики наземного базування і забезпечують можливість проведення вимірювань параметрів та характеристик довкілля у повітряному середовищі в умовах надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру. Важливість та необхідність розвитку таких систем пов'язана з тим, що процеси повітряного перенесення шкідливих речовин відіграють вирішальну роль у формуванні полів забруднення повітряного простору, поверхні землі та водоєм за наявності шкідливих викидів на ТЕС. Крім того такі системи можуть стати незамінним інструментом дослідження довкілля на ранніх етапах розвитку нештатних ситуацій в районах ТЕС в умовах гострого дефіциту часу, апаратних засобів та обмеженої апріорної інформації про масштаби аварій.

Програма моніторингу включає контроль концентрації шкідливих речовин у верхніх шарах атмос-



Рис. 5. Фото ФЕП, встановленого на БПЛА.

фери та сумарного внеску джерела забруднення в нижніх шарах атмосфери, траєкторія обльоту визначається площею джерела забруднення, а також технічними можливостями БПЛА, які обумовлюють максимальну дальність польоту [3]. Відбір проб може здійснюватися з допомогою ізокінетичного пробовідбірника, виконаного у вигляді фільтро-ежекторного пристрою (ФЕП) і наведеного на рис. 4 і 5.

Використання БПЛА під час аварій на енергетичних об'єктах дозволяє отримувати в режимі реального часу фото- та відеозображення для оцінювання реальної ситуації на об'єктах та прийняття рішень щодо вибору ефективних засобів боротьби з наслідками аварій. БПЛА можуть бути обладнані звичайними фото та відеокамерами, інфрачервоними камерами для роботи в нічних умовах, тепловізійними камерами для отримання інформації про температуру в різних частинах об'єкту, пристроями для вимірювання радіаційного

фону та аналізаторами повітря для отримання даних про стан атмосфери навколо об'єктів енергетики тощо.

Разом з цим, БПЛА доцільно використовувати не тільки під час аварій, а й для періодичного моніторингу параметрів навколишнього середовища об'єктів енергетики, які працюють в штатному режимі з метою отримання інформації про стан об'єктів і навколишнього середовища в реальному часі, інспектування інфраструктури та запобігання нештатним ситуаціям.

Для моніторингу параметрів навколишнього середовища тепломереж та ЛЕП доцільно рекомендувати використання безпілотних авіаційних комплексів з двома БПЛА літакового та мультироторного типу, класу міні, масою до 10 кг, дальністю польоту до 50 км, мало-



Рис. 6. Ділянка ЛЕП, на якій проводився тепловізійний контроль.

висотними (практична стеля до 2 км), з електричним двигуном, дистанційно пілотованими, але з функціями автоматичного польоту за заданим маршрутом, вертикальним зльотом і посадкою (для мультироторної плат-

форми) та пуском з руки і приземленням літаковим способом (для БПЛА літакового типу), з передачею даних в реальному часі (фото- та відеозображення) та накопиченням даних на борту (для інших типів сенсорів).

Для моніторингу протяжних об'єктів (наприклад, ліній електропередач) пропонується застосовувати обліт вздовж об'єкта контролю з використанням БПЛА літакового типу. Для тепловізійної зйомки окремих опор ЛЕП доцільно використовувати БПЛА типу мультикоптерів. Програмне забезпечення наземної станції управління дозволяє використовувати як карту будь-яку топографічну основу. Прив'язка може бути здійснено за двома або кількома точками. Також можливе використання як топологічної основи електронних карт. Програма забезпечує введення, автоматичний контроль і редагування маршруту обльоту. Для кожної точки маршруту може бути задана висота. Для одержання тепловізійного зображення ЛЕП було використано БПЛА зі встановленим тепловимірювальним блоком, основною складовою якого є оптичний тепловізор типу Pulsar Quantum HD 50 S [6].

На рис. 6 наведено фото ділянки ЛЕП з опорою, в районі якої проводилися експериментальні дослідження. Тепловізійне зображення цієї ділянки подано на рис. 7. Проведені експерименти підтвердили працездатність вбудованого тепловізійного блоку у складі БПЛА. Практичне застосування БПЛА, на відміну від існуючих методів, забезпечує швидке проведення дистанційного температурного моніторингу протяжних об'єктів (у нашому випадку ЛЕП) у важкодоступних та небезпечних місцях [6].

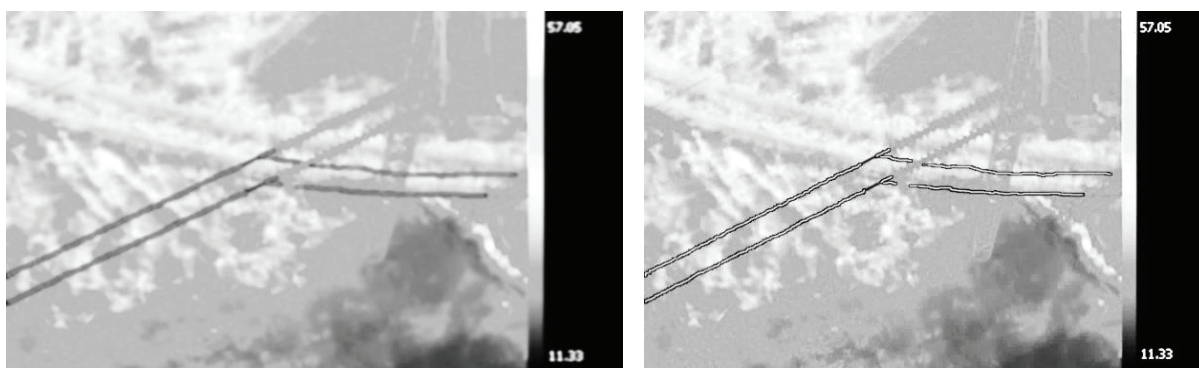


Рис. 7. Тепловізійне зображення ділянки ЛЕП:

а) – при температурі проводів 290 °C (7 год.), б) – при температурі проводів 520 °C (11 год.).

Дослідження можливостей моніторингу температурного стану магістральних трубопроводів, що призначені для передавання теплової енергії, з використанням мобільних ІВС на базі БПЛА знаходяться на етапі проведення натурних експериментів.

Висновки

Мобільні ІВС на базі БПЛА дають можливість проводити моніторинг стану і динаміки характеристик в часі і в просторі довкілля ТЕС та інших об'єктів теплоенергетики, як в режимах on-line, так і інших режимах.

В штатному режимі функціонування досліджуваних

об'єктів поточний дистанційний контроль з використанням мобільних ІВС є більш економічним у порівнянні з іншими засобами контролю.

Системи моніторингу дозволяють отримувати достовірну інформацію про функціонування об'єктів теплоенергетики. Зокрема, моніторинг параметрів забезпечує неперервний контроль основних параметрів теплотехнічних установок і технологічних процесів вироблення, транспортування та споживання тепло-ти. В результаті моніторингу технічного стану теплоенергетичного об'єкту встановлюються результати

діагностування об'єкту та прогнозування часу зміни його стану.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cai G., Dias J., Seneviratne L. A. Survey of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Future Development Trends / Unmanned Systems, 2014, Vol. 02, No. 02, P. 175–184.
2. Lelong C.C.D., Jubelin P., Burger G., Roux B., Labbe S., Baret F. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots / Sensors. – 2008. – No. 8. – P. 3557–3585.
3. Бабак С.В. Дистанційний контроль довкілля об'єктів енергетики / Вимірювальна і обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015, №4. – С. 107–112.

4. Honda K., Shrestha A., Witayangkurn A., Chinnachodteeranun R., Shimamura H. Field servers and sensor service grid as real-time monitoring infrastructure for ubiquitous sensor networks / Sensors. 2009. Vol. 9, No. 4. P. 2363–2370.

5. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики / за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака. – К.: ІТТФ НАН України, 2015. – 512 с.

6. Бабак С.В., Мислович М.В. Особливості практичного використання автономних діагностичних комплексів для теплового контролю повітряних ліній електропередачі / Технічна електродинаміка. – 2016. – № 1. – С. 73–80.

MONITORING OF OBJECTS OF POWER SYSTEM USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Babak V.P.

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

Considered principles of creation and practical use of mobile information and measurement systems to monitor environmental characteristics of thermal power facilities and the possibility of using this purpose unmanned aerial vehicles. References 6, figures 7.

Key words: monitoring the technical condition, heating facilities, drones, information-measuring systems

1. Cai G., Dias J., Seneviratne L. A. Survey of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Future Development Trends / Unmanned Systems, 2014, Vol. 02, No. 02, Pp. 175–184.
2. Lelong C.C.D., Jubelin P., Burger G., Roux B., Labbe S., Baret F. Assessment of unmanned aerial vehicles

imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots / Sensors. 2008. No. 8. P. 3557–3585.

3. Babak S.V. Remote control environment energy facilities / Measuring and computing in technological processes. 2015, №4. P. 107–112. (Ukr)

4. Honda K., Shrestha A., Witayangkurn A., Chinnachodteeranun R., Shimamura H. Field servers and sensor service grid as real-time monitoring infrastructure for ubiquitous sensor networks / Sensors. 2009. Vol. 9, No. 4. P. 2363–2370.

5. Information management monitoring facilities heating / edited corresponding member of NAS of Ukraine V.P. Babak. – K.: Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, 2015. 512 p. (Ukr)

6. Babak S.V., Myslovych M.V. Features practical use of independent diagnostic-sector and thermal control air lines / Technical electrodynamics. 2016. № 1. P. 73–80. (Ukr)

Получено 13.03.2017
Received 13.03.2017

МУЛЬТИМАСШТАБНИЙ АНАЛІЗ МІКРО- ТА НАНОТЕЧІЙ

Авраменко А.О., член-кореспондент НАН України

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

Представлено огляд та аналіз методів моделювання мікро- та нанопроцесів. Розглянуто особливості математичних моделей та межі їх використання в залежності від масштабу мікросистем.

Представлен обзор и дан анализ методов моделирования микро- и нанопроцессов. Рассмотрены особенности математических моделей и границы их использования в зависимости от масштабов микросистем.

A review is presented and analysis of methods for modeling micro- and nano flows is given. The features of mathematical models and the limits of their application are considered depending on the scale of microsystems.

Бібл. 30.

Ключові слова: процеси в мікро- та наноканалах, математичне моделювання.

L – довжина ковзання,
 e – внутрішня енергія,
 Θ – температура,
 g – сила тяжіння,
 n – кількість атомів, частинок,
 m – маса атому, частинки,
 u – швидкість,
 q – тепловий потік,
 x – координата,
 t – час,

ρ – щільність,
 σ_{ki} – тензор напружень,
 Ec – число Еккерта,
 Kn – число Кнудсена,
 Pr – число Прандтля,
 Re – число Рейнольдса.

Індекси:

i, j – номери частинок,
 w – стінка,
 s – стала.

Течії в мікроканалах суттєво відрізняються від течій в макроканалах. Процеси в мікроканалах не завжди можуть бути досліджені з використанням звичних моделей потоку, таких як рівняння Нав'є-Стокса з граничними умовами прилипання на границі рідина-тверде тіло, що регулярно і успішно застосовується для макропотуку. Градієнт тиску вздовж довгого мікроканалу при спостереженнях виявляється непостійним, а виміряна швидкість потоку є вищою порівняно з прогнозом традиційної суцільної моделі потоку. Очевидно, що в мікропристроях домінують поверхневі ефекти. Відношення поверхні до об'єму для пристрою з характерною довжиною в один метр – 1 м^{-1} , в той час як для пристрою мікроелектронних систем, що має розмір 1 мікрон – 10^{-6} м^{-1} . Зменшення масштабів мікропристроїв може призвести до анулювання наближення суцільного середовища в цілому. Проковзування потоку, тепловий стрибок, розрідження, в'язка дисипація, стисливість, міжмолекулярні сили та інші нетрадиційні ефекти, можливо, доведеться брати до уваги, порівняно з використанням тільки основних принципів, таких, як збереження маси, другий закон Ньютона, збереження енергії.

Механіка мікрорідин є більш складною. Молекули більш щільно упаковані при нормальному тиску і температурі, а також більшими є потенціали притягування або зчеплення між молекулами рідини, та між рідкою і твердою фазами, якщо характерний розмір потоку досить малий. У випадках, коли традиційна модель неперервного середовища не забезпечує точність розрахунків, використовуються більш затратні методи молекулярної динаміки або дисипативної динаміки часток. Але ці методи потребують значно більших обчислюваних затрат для реалістичного моделювання потоку, бо необхідно

враховувати надзвичайно велику кількість молекул чи часток. Можна визначити три різних підходи до середовища, що моделюється. Перший підхід розглядає рідину як суцільне середовище, гідродинаміка якого повністю описується рівняннями Нав'є-Стокса, теплообмін – рівнянням теплопровідності Фур'є-Кірхгофа. В роботах [1,2] зазначено, що традиційний підхід суцільного середовища справедливий за умови, що число Кнудсена $Kn < 0,1$. Причому, згідно роботи [1], в діапазоні $0,001 < Kn < 0,1$, а за даними роботи [2] в діапазоні $0,01 < Kn < 0,1$, необхідно використовувати граничні умови проковзування на стінках. Режимми течії, що відповідають діапазону чисел Кнудсена $0,1 < Kn < 10$ вважаються перехідними. В цих режимах зазвичай використовують статистичні методи, наприклад Монте-Карло, або методи, що базуються на рівнянні Больцмана. Системи, для яких число Кнудсена $Kn > 10$ вважаються сукупністю вільних молекул. Для їх моделювання використовуються методи молекулярної динаміки, дисипативної динаміки часток або фізико-хімічні методи.

Модель суцільного середовища

Модель суцільного середовища, що втілена в рівняннях Нав'є-Стокса, застосовується при чисельному моделюванні потоку. Модель ігнорує молекулярну природу газів і рідин і розглядає рідину, як суцільне середовище, що описується в термінах просторових і часових варіацій щільності, швидкості, тиску, температури та інших макроскопічних параметрів течії.

В принципі, модель суцільного середовища дає досить точні результати доти, доки локальні властивості, такі як щільність та швидкість можна визначити як середні

за великими областями в порівнянні з мікроскопічною структурою рідини, але значно меншими в порівнянні з масштабами макроскопічних явищ. Саме за цих умов можливе використання диференціального обчислення для їх опису. Крім того, умови потоку не повинні бути занадто далекими від термодинамічної рівноваги. Перша умова виконується практично завжди, тоді як друга, як правило, обмежує істинність рівнянь суцільного середовища. Напряда зсуву та тепловий потік зазвичай повинні бути виражені в термінах більш низького порядку макроскопічних величин, таких як швидкість і температура, і найпростіші відносини дійсні тільки коли потік знаходиться поблизу термодинамічної рівноваги. Що ще гірше, традиційна умова прилипання рідини на межі твердого тіла й рідини порушується навіть раніше, ніж лінійна залежність між напругою і деформацією стає недійсною.

Для моделі суцільного середовища справедливі збереження маси, імпульсу і енергії. Гідродинамічний та тепловий стан системи можна виразити в кожній точці простору і часу у вигляді сукупності диференціальних рівнянь в частинних похідних наступним чином [1]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) &= 0 \\ \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) &= \frac{\partial \sigma_{ki}}{\partial x_k} + \rho g_i, \\ \rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + u_k \frac{\partial e}{\partial x_k} \right) &= - \frac{\partial q_k}{\partial x_k} + \sigma_{ki} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (1)$$

де q_k є сумою векторів теплового потоку, що зумовлені теплопровідністю та випромінюванням. Зазвичай при використанні моделі суцільного середовища використовують граничні умови без проковзування на стінці.

Згідно [1] модель суцільного середовища справедлива, коли довжина вільного пробігу молекули L є набагато меншою, ніж характерний розмір потоку h . При порушенні цієї умови, потік більше не перебуває поблизу рівноважного стану і лінійне співвідношення між напругою і швидкістю деформації, а також стан швидкості без проковзування більше не є дійсними. Також порушується лінійна залежність між тепловим потоком і градієнтом температури і температурний режим на границі розділу твердого тіла й рідини стає стрибкоподібним. Як для рідин, так і для газів, використовується емпірична лінійна гранична умова Нав'є за якою дотичне ковзання швидкості на стінці $\Delta u|_w$ є пропорційним локальному зсуву

$$\Delta u|_w = u_{\text{рідини}} - u_{\text{стілки}} = L_s \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_w, \quad (2)$$

де $\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_w$ – швидкість деформації на стінці.

В роботі [3] наведені результати чисельного дослідження тривимірного ламінарного потоку з проковзуванням і теплообміном в прямокутному мікроканалі, що має стінки з постійною температурою. Для чисельних розрахунків були використані наступні безрозмірні вирази для визначення швидкості на стінці

$$U = \left(\frac{2 - \sigma_v}{\sigma_v} \right) \text{Kn} \frac{\partial U}{\partial n} + \frac{3}{2\pi} \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right) \frac{\text{Kn}^2 \text{Re}}{\text{Ec}} \frac{\partial \theta}{\partial Z}, \quad (3)$$

де $\frac{\partial U}{\partial n}$ – поперечний градієнт швидкості, а $\frac{\partial \theta}{\partial Z}$ – тангенціальний градієнт температури на стінці. А також стрибок температури

$$\theta - \theta_{\text{wall}} = \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\text{Kn}}{\text{Pr}} \frac{\partial \theta}{\partial n}, \quad (4)$$

де σ_v та σ_T – коефіцієнти акомодатії тангенціального імпульсу, що описують взаємодію молекул рідини зі стінкою.

Отже, з розвитком мікомасштабних теплових гідросистем, і досі існує необхідність досліджувати гідродинаміку й теплообмін потоку з проковзуванням в мікроканалах різної конфігурації. Метод суцільного середовища також досить точно описує процеси, що відбуваються в нанорідинах. На даний момент найбільш адекватною моделлю, що описує тепломасообмін та гідродинаміку нанорідин, є модель J. Buongiorno [4]

Метод ґрат Больцмана (LBM)

Метод ґрат Больцмана (Lattice Boltzmann Method) – метод ґратчастого газу з дискретною кінетикою частинки, який використовує дискретну решітку і дискретний час [5]. LBM може також розглядатися як спеціальна кінцево-різницева схема кінетичного рівняння функції розподілу дискретної швидкості частинки. Ідея використовувати спрощене кінетичне рівняння для швидкості однієї частинки, щоб моделювати перебіг рідини, використовувалася в дослідженнях [6,7]. Ідея методу LBM полягає в наступному [8]. Розглядається імовірнісний розподіл $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$, визначений таким чином, що $\int f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v}$ визначає кількість частинок в момент часу t , що знаходяться в паралелепіпеді, обмеженому точками $\mathbf{r}$ і $\mathbf{r} + d\mathbf{r}$, швидкості яких лежать в інтервалі між $\mathbf{v}$ і $\mathbf{v} + d\mathbf{v}$. Припустимо, що на всі частинки діє сила $\mathbf{F}$. Тоді, якщо припустити, що частинки речовини не стикаються між собою, то зміна розподілу f з часом має відбуватися на підставі рівняння Больцмана

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} \cdot \frac{\mathbf{F}}{m} = \Omega(f) d\mathbf{r} d\mathbf{v} dt. \quad (5)$$

де $\Omega(f)$ – оператор зіткнення.

В подальшому, метод LBM був вдосконалений і апробований на класичних задачах, таких як течія Пуазейля, або течія в каверні з рухомою кришкою [9, 10]. Використана двовимірна решітка. Досить повний опис методу даний в [11]. Окрім задач гідродинаміки метод LBM також дає можливість моделювати процеси теплообміну [12-14].

Модель молекулярної динаміки (MD)

Основу методу молекулярної динаміки становить чисельне рішення класичних рівнянь Ньютона для системи взаємодіючих частинок:

$$m_i \mathbf{a}_i = \mathbf{F}_i(\mathbf{r}_i), i = 1 \dots n, \quad (6)$$

де $\mathbf{a}$ та $\mathbf{r}$ – прискорення та координати атому, $\mathbf{F}$ – сукупність діючих на атом сил.

Сучасний розвиток обчислювальної техніки дозволяє моделювати динаміку молекулярних систем, що складаються з мільйонів частинок, з великим набором параметрів і різноманітних умов, що імітують фізичний експеримент [15]. Моделювання реальних фізичних систем, наприклад кристалів, або величезних біологічних молекул на базі методів МД являє собою дуже перспективний напрямок в найближчому майбутньому [16,17]. Нетривіальним аспектом застосування методів МД є оптимальний вибір потенціалів взаємодії, який визначає еволюцію системи [18,19]. Адекватний вибір потенціалу взаємодії і оптимізація його параметрів дуже важливі, наприклад, для моделювання міжфазних гетерогенних процесів (взаємодії кластерів з поверхнею, явища нуклеації парів на твердій основі і т.п.) [20].

Метод дисипативної динаміки частинок (DPD)

Серед складних систем, що вивчаються з використанням комп'ютерного моделювання, необхідно згадати системи, які часто складаються з рідкого середовища, в якому розчинені різноманітні об'єкти, їх називають складними флюїдами [21]. В роботі [22] наведена модель дисипативної динаміки частинок для аналізу гідродинаміки полімерних розчинів. Модель складається з частинок, що рухаються в неперервному середовищі. Цей домен ефективно відтворений в просторі за допомогою стандартним періодичним граничним умовам для імітації нескінченного середовища. Подібно до методу молекулярної динаміки конфігурація системи визначається всіма позиціями $\mathbf{r}_i$ та імпульсами $\mathbf{p}_i$. Система оновлюється з дискретним часовим кроком δt , що складається з фази зіткнення та подальшої фази поширення. При зіткненні фазові імпульси одночасно оновлюються відповідно до простого правила

$$\mathbf{p}_i(t + \delta t) = \mathbf{p}_i(t) + \sum_j \Omega_{ij} \mathbf{e}_{ij}, \quad (7)$$

де $\mathbf{e}_{ij}$ – одиничний вектор, спрямований від j до i частинки, а скаляр Ω_{ij} відображає передачу моменту від j до i частинки. В фазі поширення координати частинок визначаються співвідношенням

$$\mathbf{r}_i(t + \delta t) = \mathbf{r}_i(t) + \frac{\mathbf{p}_i(t + \delta t)}{m_i} \delta t.$$

Розвиток методу DPD знайшов в роботах [23–26.] Універсальність методу DPD і теоретичне обґрунтування властивостей зробило його привабливим методом для крупнозернистих моделювань складних систем. Цікавий огляд застосування методу дається в роботі [27]. Одним з перших застосувань DPD було моделювання колоїдних суспензій. Колоїди можуть бути змодельовані в DPD, обмежуючи частинки в певній області, немов вони утворюють тверде тіло, що рухається крізь навколишню рідину. Крім того, DPD був використаний для моделювання полімерних систем. Застосування відповідних типів частинок можна побудувати складні архітектури полімерів, наприклад сополімерів. Реологічні властивості таких систем були вивчені і показують гарне узгодження з кінетичною теорією полімерів [28]. В роботі [29] використовували DPD для вивчення фазового розділення в бінарних незмішувальних

рідинах. Нарешті, DPD використовується для вивчення самоорганізації та фазової поведінки ліпідного подвійного шару (lipid bilayers) мембран [30].

ЛІТЕРАТУРА

1. *Gad-el-Hak M.* The fluid mechanics of microdevices-the freeman scholar lecture // J. Fluids Eng. – 1999. – vol. 121. – P. 5 – 33.
2. *Karniadakis GE., Beskok A., Aluru A.* Microflows and nanoflows: fundamentals and simulation. Springer, Berlin. –2005
3. *Madhawa Hettiarachchi H.D., Golubovic M., William M. Worek, W.J. Minkowycz* Three-dimensional laminar slip-flow and heat transfer in a rectangular microchannel with constant wall temperature // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2008. – 51. –P. 5088–5096.
4. *Buongiorno J.* Convective transport in nanofluids, //J. Heat Transfer. – 2006. –128. –P. 240–250.
5. *Chen S, Gary D. Doolen.* Lattice Boltzmann method for fluid flows // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1998. – № 30. – P.329 – 364
6. *Broadwell JE.* Study of rarefied shear flow by the discrete velocity method // J. Fluid Mech. – 1964. – №19. – P. 401–414.
7. *Inamuro T., Sturtevant B.* Numerical study of discrete-velocity gases // Phys. Fluids. – 1990. –№2. – P.2196 – 2203.
8. *Sukop, M.C., Thorne D.T., Jr.* Lattice Boltzmann Modeling: An Introduction for Geoscientists and Engineers. Springer, Heidelberg, Berlin, New York. – 2006 (second printing 2007). – 172 p.
9. *Chen S., Doolen G.D.* Lattice Boltzmann method for fluid flows//Annu. Rev. Fluid Mech. –1998. – 30. – P. 329–364.
10. *Luo L.S.* Unified theory of the lattice Boltzmann models for nonideal gases// Phys. Rev. Lett. –1998. – 81 (8). –P. 1618–1621.
11. *Benzi R, Succi S, Vergassola M.* The lattice Boltzmann equation: theory and applications// Phys. Rep. – 1992. –222 (3). –P. 145–197.
12. *Lallemand P., Luo L.S.* Hybrid finite-difference thermal lattice Boltzmann equation// Int. J. Mod. Phys. – 2003. – B 7 (1&2). –P. 41–47.
13. *Alexanders F., Chen S., Sterling J.* Lattice Boltzmann thermo-hydrodynamics// Phys. Rev. E. –1993. – 47. – R2249–R2252.
14. *He X., Chen S., Doolen G.D.* A novel thermal model for the lattice Boltzmann method in incompressible limit// J. Comput. Phys. –1998. – 146. –P. 282–300.
15. *Qi L., Young W.L., Sinnott S.B.* Polymerization via cluster E solid surface impacts: molecular dynamics simulations // J. Phys. Chem. B. –1997. – V. 101. – P. 6883.
16. *Журкин В. Б., Полтев В. И., Флорентьев В. Л.* Атом-атомные потенциальные функции для конформационных расчетов нуклеиновых кислот //Молекулы. биология. –1980. –Т. 14, вып. 5. – С. 1116–1130.
17. *Lewis J. P., Sankey O. F.* Geometry and energetics of DNA basepairs and triplets from first principles quantum molecular relaxations // Biophys. J. – 1995. –V. 69. –

P. 1068–1076.

18. *Alfonso D.R., Ulloa S.E., Brenner D.W.* Hydrocarbon adsorption on a diamond (100) stepped surface // *Phys. Rev. B.* –1994. –V. 49, No. 7. – P. 4948–4953.

19. *Brenner D.W.* Empirical potential for hydrocarbons for use in simulating the chemical vapor deposition of diamond films // *Phys. Rev. B.* –1990. –V. 42, No. 15. –P. 9458–9471.

20. *Jorgensen W.L. et al.* Comparison of simple potential functions for simulating liquid water // *J. Chem. Phys.* –1983. –V. 79, No. 2. –P. 926–935.

21. *Schiller D.* Dissipative Particle Dynamics. A Study of the Methodological Background // – Diploma Thesis. – 2005. – 180p.

22. *Schlijper A.G., Hoogerbrugge P.J., Manke C.W.* Computer simulations of dilute polymer solutions with the dissipative particle dynamics method // *J. Rheol.* – 1995. – V.39, №3 – P.567–579.

23. *Bonet Avalos J., Mackie A.D.* Dissipative particle dynamics with energy conservation. // *Europhys. Lett.* – 1997. – V.40, №2. –P.141–146.

24. *Español P.* Dissipative particle dynamics with

energy conservation // *Europhys. Lett.* – 1997. – V.40, №6. – P.631–636.

25. *Bonet Avalos J., Mackie A.D.* Dynamic and transport properties of dissipative particle dynamics with energy conservation // *J. Chem. Phys.* – 1999. – V.111, №11. – P.5267–5276.

26. *Willemsen S.M., Vlugt T.J.H., Hoefsloot H.C.J., Smit B.* Combining Dissipative Particle Dynamics and Monte Carlo Techniques // *J. Comp. Phys.* – 1998. – V.147. – P.507–517.

27. *Warren P.B.* Dissipative particle dynamics // *Curr. Op. Coll. Interf. Sci.* – 1998. – V.3, №6. – P.620–624.

28. *Kong Y., Manke C.W., Madden W.G., Schlijper A.G.* Modeling the rheology of polymer solutions by dissipative particle dynamics // *Tribology Lett.* – 1997. – V.3. – P.133–138.

29. *Novik K.E., Coveney P.C.* Using dissipative particle dynamics to model binary immiscible fluids // *Int. J. Mod. Phys. C.* – 1997. – V.8, №4. – P. 909–918.

30. *Kranenburg M.* Phase transitions of lipid bilayers: a mesoscopic approach / PhD thesis, Universiteit van Amsterdam. – 2004.

MULTISCALE ANALYSIS OF MICRO- AND NANO-FLOWS

Avramenko A.A.

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

Multiscale analysis of micro and nano-flows was carried out. The features of mathematical models and the limits of their application are considered depending on the scale of microsystems. The estimation of the possibility of using mathematical models of different levels for studying hydrodynamics and heat transfer in micro and nano devices is given. References 30.

Key words: processes in micro- and nano channels, mathematical modeling

1. *Gad-el-Hak M.* (1999) The fluid mechanics of microdevices-the freeman scholar lecture. *J. Fluids Eng.* vol. 121. P. 5 – 33.
2. *Karniadakis G.E., Beskok A., Aluru A.* 2005. Microflows and nanoflows: fundamentals and simulation. Springer, Berlin.
3. *Madhawa Hettiarachchi H.D., Golubovic M., William M. Worek, W.J.* Minkowycz. 2008. Three-dimensional laminar slip-flow and heat transfer in a rectangular microchannel with constant wall temperature. *Int. J. Heat Mass Transfer.* 51. P. 5088–5096.
4. *Buongiorno J.* 2006. Convective transport in nanofluids, *J. Heat Transfer.* 128. P. 240–250.
5. *Chen S, Gary D. Doolen.* 1998. Lattice Boltzmann method for fluid flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.* № 30. P.329 – 364
6. *Broadwell J.E.* 1964. Study of rarefied shear flow by the discrete velocity method. *J. Fluid Mech.* №19. P. 401–414.
7. *Inamuro T., Sturtevant B.* 1990. Numerical study of discrete-velocity gases. *Phys. Fluids.* №2. P.2196 – 2203.
8. *Sukop, M.C., Thorne D.T., Jr.* 2006. Lattice Boltzmann Modeling: An Introduction for Geoscientists and Engineers. Springer, Heidelberg, Berlin, New York. (second printing 2007). 172 p.
9. *Chen S., Doolen G.D.* 1998. Lattice Boltzmann method for fluid flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 30. P. 329–364.
10. *Luo L.S.* 1998. Unified theory of the lattice Boltzmann models for nonideal gases. *Phys. Rev. Lett.* 81 (8). –P. 1618–1621.
11. *Benzi R, Succi S, Vergassola M.* 1992. The lattice Boltzmann equation: theory and applications. *Phys. Rep.* 222 (3). –P. 145–197.
12. *Lallemand P., Luo L.S.* 2003. Hybrid finite-difference thermal lattice Boltzmann equation *Int. J. Mod. Phys. – B* 7 (1&2). –P. 41–47.
13. *Alexanders F., Chen S., Sterling J.* 1994. Lattice Boltzmann thermo-hydrodynamics. *Phys. Rev. E.* 47. – R2249–R2252.
14. *He X., Chen S., Doolen G.D.* 1998. A novel thermal model for the lattice Boltzmann method in incompressible limit. *J. Comput. Phys.* 146. P. 282–300.
15. *Qi L., Young W.L., Sinnott S.* (1997) Polymerization via cluster E solid surface impacts: molecular dynamics simulations. *J. Phys. Chem. B.* V. 101. P. 6883.
16. *Zhurkin V.B., Potlev V.I., Florentev V.L.* 1980. Atom-atomnye potentsialnye funktsii dlia konformatsionnyh rastchetov nukeinovyh kislot. *Molekul. Biologia.* T. 14, V. 5. P. 1116–1130 (Rus).
17. *Lewis J.P., Sankey O.F.* 1995. Geometry and energetics of DNA basepairs and triplets from first principles quantum molecular relaxations. *Biophys. J.* –V. 69. – P. 1068–1076.
18. *Alfonso D.R., Ulloa S.E., Brenner D.W.* 1994. Hydrocarbon adsorption on a diamond (100) stepped surface. *Phys. Rev. B.* V. 49, No. 7. P. 4948–4953.
19. *Brenner D.W.* 1990. Empirical potential for hydrocarbons for use in simulating the chemical vapor deposition of diamond films. *Phys. Rev. B.* V. 42, No. 15. P. 9458–9471.
20. *Jorgensen W. L. et al.* 1983. Comparison of simple potential functions for simulating liquid water. *J. Chem. Phys.* V. 79, No. 2. P. 926–935.
21. *Schiller D.* 2005. Dissipative Particle Dynamics. A Study of the Methodological Background. Diploma Thesis. 180p.
22. *Schlijper A.G., Hoogerbrugge P.J., Manke C.W.* 1995. Computer simulations of dilute polymer solutions with the dissipative particle dynamics method. *J. Rheol.* V.39, №3 P.567–579.
23. *Bonet Avalos J., Mackie A.D.* 1997. Dissipative particle dynamics with energy conservation. *Europhys. Lett.* V.40, №2. P.141–146.
24. *Español P.* 1997. Dissipative particle dynamics with energy conservation. *Europhys. Lett.* V.40, №6. P.631–636.
25. *Bonet Avalos J., Mackie A.D.* 1999. Dynamic and transport properties of dissipative particle dynamics with energy conservation. *J. Chem. Phys.* V.111, №11. P.5267–5276.
26. *Willemsen S.M., Vlugt T.J.H., Hoefsloot H.C.J., Smit B.* 1998. Combining Dissipative Particle Dynamics and Monte Carlo Techniques. *J. Comp. Phys.* V.147. P.507–517.
27. *Warren P.B.* (1998) Dissipative particle dynamics. *Curr. Op. Coll. Interf. Sci.* V.3, №6. P.620–624.
28. *Kong Y., Manke C.W., Madden W.G., Schlijper A.G.* 1997. Modeling the rheology of polymer solutions by dissipative particle dynamics. *Tribology Lett.* V.3. P.133–138.
29. *Novik K.E., Coveney P.C.* 1997. Using dissipative particle dynamics to model binary immiscible fluids. *Int. J. Mod. Phys. C.* V.8, №4. P. 909–918.
30. *Kranenburg M.* 2004. Phase transitions of lipid bilayers: a mesoscopic approach. PhD thesis, Universiteit van Amsterdam.

Получено 14.03.2017
Received 14.03.2017

ПОЛИМЕРНЫЕ МИКРО- И НАНОКОМПОЗИТЫ КАК ОБЪЕКТЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

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

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

²Николаевский национальный университет им. В.А.Сухомлинского², ул. Никольская 24, Николаев, 540030, Украина

Наведено результати досліджень закономірностей зміни теплофізичних характеристик і механізмів кристалізації для широкого кола полімерних мікро- і нанокомпозитів, орієнтованих на виготовлення елементів теплоенергетичного обладнання. Виконано аналіз ефективності використання високо- і низькотеплопровідних модифікацій даних композиційних матеріалів.

Представлены результаты исследований закономерностей изменения теплофизических характеристик и механизмов кристаллизации для широкого круга полимерных микро- и нанокомпозитов, ориентированных на изготовление элементов теплоэнергетического оборудования. Выполнен анализ эффективности использования высоко- и низкотеплопроводных модификаций данных композиционных материалов.

The results of studies of the regularities of the change in thermophysical characteristics and crystallization mechanisms for a wide range of polymeric micro- and nanocomposites oriented on production of elements of heat-power engineering equipment are presented. An analysis of the efficiency of using high- and low-conductivity modifications of these composite materials is done.

Библ. 18, рис. 3, табл. 1.

Ключевые слова: полимерные микро- и нанокомпозиты, теплофизические свойства, теплоэнергетическое оборудование.

a_m – приведенный параметр нуклеации;
 c^p – удельная массовая теплоемкость;
 f^p – относительная доля механизма кристаллизации, связанного с кристаллизацией собственно полимерной матрицы;
 p, q – показатели степени в уравнениях Киркпатрика и Маклахлана;
 K_m – приведенный транспортный барьер;
 K_n – эффективная константа скорости;
 m – безразмерный параметр формы;
 m^* – масса теплообменной поверхности;
 n – псевдопараметр формы;
 Q – теплопроизводительность утилизатора теплоты;
 Q^* – приведенная теплопроизводительность утилизатора теплоты, $Q^* = Q/m^*$;
 T – абсолютная температура;
 T_N, T_K – абсолютная температура начала и окончания кристаллизации;
 t – температура;
 t_r^H – температура отходящих газов котла в номинальном режиме;
 $t_{нв}$ – температура наружного воздуха;
 ΔT – температурный интервал кристаллизации;
 T_M – абсолютная температура расплава, отвечающая максимальному значению теплового потока;

$T_{\max}$ – максимальная температура эксплуатации композита;
 V – объем теплообменной поверхности;
 V_t – скорость охлаждения;
 V^* – приведенный объем теплообменной поверхности, $V^* = V/Q$;
 α – относительная объемная доля кристаллической фазы;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 λ_1, λ_2 – коэффициент теплопроводности материала матрицы и наполнителя;
 λ', λ'' – коэффициент теплопроводности композита в непосредственной близости слева ω_- и справа ω_+ от порога перколяции;
 $\lambda_{эф}$ – коэффициент теплопроводности композита; $\bar{\tau}$ – время;
 τ – приведенное время, $\tau = V_t \cdot \bar{\tau}$;
 ω – массовая доля наполнителя, $0 < \omega < 1$;
 ω_c – значение ω , отвечающее порогу перколяции;
КТП – кольцевые турбулизаторы потока;
ПК – поликарбонат;
ПММА – полиметилметакрилат;
ПП – полипропилен;
ПЭ – полиэтилен;
УНТ – углеродные нанотрубки.

Введение

Повышение требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам различных элементов теплоэнергетического оборудования, обуславливает необходимость применения принципиально новых материалов для их изготовления. Среди таких материалов особо выделяются полимерные микро- и нанокомпозиты, обладающие целым рядом уникальных физических свойств.

Широкое использование полимерных микро- и нанокомпозиционных материалов в теплоэнергетике требует большого объема знаний их теплофизических свойств. К важнейшим из них относятся теплопроводность, теплоемкость, теплота кристаллизации и пр. При этом необходимой является весьма детальная информация об указанных свойствах, включающая, в частности, их температурные, концентрационные и другие зависимости.

Перспективные направления использования полимерных микро- и нанокомпозитов в теплоэнергетике связаны с применением их высокотеплопроводных и низкотеплопроводных модификаций. Первые ориентированы на использование для изготовления теплообменных поверхностей различного назначения, вторые – для создания трубопроводов разных энергетических систем (воздухо-, водо-, масло-, топливопроводов), дымовых труб, защитных теплоизоляционных слоев теплоэнергетического оборудования и пр.

Особый интерес представляет решение задачи выбора требуемых композиционных материалов для изготовления указанных элементов теплоэнергетического оборудования. При этом важными являются исследования эффективности оборудования, основные элементы которого изготовлены из рассматриваемых полимерных микро- и нанокомпозитов, в сравнении с ситуацией применения традиционных материалов.

Анализ последних исследований

Системные исследования полимерных нанокомпозитов проводятся лишь на протяжении последнего десятилетия. Большой вклад в развитие этой проблематики внесен работами Хана З., Кинга М., Вундерлиха Б., Зенга Д., Липатова Ю.С., Привалка В.П., Шилова В.В., Шевченка В., Любовка Н.И. и др. [1-10]. К основным направлениям данной тематики относятся исследования структурообразования и свойств нанокомпозитов, механизмов процессов переноса в них, методов получения и пр. При этом данные исследования касаются, главным образом, фундаментальных аспектов нанонауки. Большое внимание уделяется также изучению возможности получения рекордных перспективных свойств нанокомпозитов. В части же прикладного аспекта исследований необходимо отметить, что они не удовлетворяют растущие потребности практики использования нанокомпозиционных материалов различного назначения.

Одним из важных направлений использования полимерных нанокомпозитов является теплоэнергетика. В ряде работ рассматриваются вопросы, касающиеся применения данных материалов для изготовления дета-

лей теплоэнергетического оборудования (см., например, [11-15]). Задачи распространения использования полимерных нанокомпозитов в теплоэнергетике обуславливают необходимость проведения их всесторонних теплофизических исследований.

Формулировка цели и задач исследований

Цель работы состоит в установлении закономерностей изменения комплекса теплофизических свойств широкого круга полимерных микро- и нанокомпозитов, анализе процессов их кристаллизации, разработке на этой основе элементов теплоэнергетического оборудования и определении его эффективности.

В задачу исследования входило определение комплекса теплофизических свойств и механизмов кристаллизации высоко- и низкотеплопроводных полимерных микро- и нанокомпозитов для различных типов полимерных матриц и наполнителей при изменении в широких пределах массовой доли последних. Сравнительному анализу подлежали характеристики разрабатываемых композитов, полученных с использованием метода, основанного на смешении компонентов в сухом виде, и метода, в котором данное смешение осуществляется в расплаве полимера. Ставилась задача разработки типоряда высокотеплопроводных полимерных композитов в широком диапазоне изменения коэффициента теплопроводности λ (от 20 до 60 Вт/(м·К)) для изготовления теплообменных поверхностей. Кроме того рассмотрению подлежали вопросы, связанные с созданием низкотеплопроводных композитов с улучшенными механическими свойствами для изготовления различных трубопроводных систем.

Среди задач исследования важной являлась также задача определения типов полимерных композиционных материалов, предназначенных для изготовления тех или иных деталей теплоэнергетического оборудования. Здесь представляло интерес рассмотреть в качестве примера возможности использования разрабатываемых композитов для изготовления разных теплообменных поверхностей с целью создания различных теплоутилизационных систем. К задачам, требующим особого внимания, относится также сравнительный анализ эффективности теплоэнергетического оборудования, изготовление которого базировалось на применении полимерных композиционных либо традиционных материалов.

Методика проведения исследований

При проведении исследований использовался ряд экспериментальных и теоретических методов. Среди экспериментальных методов можно выделить методы получения полимерных композитов. Здесь рассмотрению подлежали два класса методов, первый из которых базировался на смешении компонентов в сухом виде, второй – в расплаве полимера. Экспериментальное определение теплофизических и механических свойств полимерных композитов и их структуры осуществлялось следующим образом:

- коэффициентов теплоемкости c_p материалов, экзотерм кристаллизации и эндотерм плавления – мето-

дом дифференциальной сканирующей калориметрии на установке Перкина-Элмера DSC-2;

- коэффициентов теплопроводности материалов – с использованием прибора ИТ-λ-400;

- механических свойств материалов – методом деформационной калориметрии;

- структуры материалов – с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-4-07.

Что касается теоретических методов, то здесь при исследовании теплопроводности материалов применялись методы теории эффективной среды и методы теории перколяции.

Исследование структурообразования полимерных микро- и нанокомпозитов базировалось на использовании экспериментально-теоретических методов. Здесь первый этап исследований состоял в экспериментальном определении экзотерм затвердевания композита при его охлаждении из расплава с заданной постоянной скоростью. На втором этапе с использованием полученных экспериментальных данных теоретически определялись характеристики структурообразования для двух стадий кристаллизации композитов [16]. При этом для стадии зарождения отдельных структурно-упорядоченных подобластей это определение осуществлялось с использованием уравнения нуклеации

$$\ln \{V_t [(m+1) T_N - T_M] (T_M)^m / T_N^2 (\Delta T)^{m+1}\} = \ln (K_m / a_m) - a_m (T_M)^m / T_N (\Delta T)^m. \quad (1)$$

Для стадии формирования таких структур во всем объеме композита применялось уравнение Колмогорова-Аврами

$$\alpha(\tau) = f \left[1 - \exp(-K'_n \tau^{n'}) \right] + (1-f) \cdot \left[1 - \exp(-K''_n \tau^{n''}) \right], \quad (2)$$

здесь один штрих в надстрочных индексах относит величины к механизму кристаллообразования, который связан с кристаллизацией собственно полимерной матрицы, а два штриха – к механизму, в котором роль центров кристаллизации выполняют частицы наполнителя.

Тепловой расчет теплоутилизационного оборудования котлоагрегатов проводился по методике, основные положения которой изложены в [17, 18].

Изложение основного материала

В рамках настоящей работы при создании полимерных микро- и нанокомпозитов в качестве полимерных матриц использовались частично кристаллические и аморфные полимеры, в качестве наполнителей – микро-частицы Al, Cu, оксида железа, углеродные нанотрубки (УНТ), аэросил, каолин, технический углерод и др. При этом массовая доля наполнителя изменялась от 0,2 до 10,0 %.

На основе выполненного комплекса экспериментальных и экспериментально-теоретических исследований установлены закономерности изменения теплофизических свойств и особенностей структурообразования высокотеплопроводных полимерных композитов при использовании для их получения метода, базирующегося на смешении компонентов в сухом виде. По результатам проведенных исследований показано, что разра-

ботанные композиты обладают сравнительно высокими теплопроводящими свойствами (до значений λ равных 20 и 50 Вт/(м·К) соответственно в случае наполнения поликарбоната микрочастицами алюминия и УНТ) при относительно небольшом содержании наполнителей – до 10 %.

При построении концентрационных зависимостей для коэффициентов теплопроводности рассматриваемых композитов обнаружен эффект резкого изменения λ при определенных критических содержаниях наполнителей. Представленная интерпретация данного эффекта связана с образованием при указанных критических содержаниях наполнителей проводящих перколяционных структур (кластеров либо сеток).

Выполнены исследования по изучению влияния типа полимерной матрицы на теплофизические свойства и структурообразование разрабатываемых композитов. Получены данные, отвечающие полимерным матрицам с относительно высокой (полиэтилен) и низкой (поликарбонат) степенью кристалличности. На рис. 1 в качестве примера представлены концентрационные зависимости для указанных матриц, наполненных УНТ. Как видно, тип полимерной матрицы оказывает значительное влияние на теплопроводящие свойства нанокомпозитов.

По результатам выполненных исследований сделан вывод о перспективности применения данных композитов для изготовления теплообменных поверхностей различного назначения, ориентированных на передачу теплоты низкого потенциала и эксплуатацию в агрессивных средах.

В работе проведены также широкие параметрические исследования теплофизических характеристик и особенностей кристаллизации высоко- и низкотеплопроводных полимерных микро- и нанокомпозитов, полученных методом, который базируется на смешении компонентов в расплаве. При этом выполнены методические исследования в части возможности использования для прогнозирования теплофизических свойств нанокомпозитов ряда методов теории эффективной среды и теории перколяции. В работе рассмотрению подлежали две модели теории эффективной среды – модель Бруггемана и модель Максвелла, а также две модели теории перколяции – модель Киркпатрика и модель Маклахлана [19, 20]. Согласно указанным моделям эффективная теплопроводность гетерогенной системы может быть представлена в виде:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_1 \left(\frac{\lambda_2 + 2\lambda_1 - 2p(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_2 + 2\lambda_1 + p(\lambda_1 - \lambda_2)} \right), \quad (3)$$

$$1 - p = \frac{\lambda_2 - \lambda_{\text{эф}}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\frac{c\lambda_1}{\lambda_{\text{эф}}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{эф}} = \begin{cases} \lambda'_1 (\omega_c - \omega)^{-q} & \text{при } \omega < \omega_c \\ \lambda''_1 (\omega - \omega_c)^p & \text{при } \omega > \omega_c \end{cases}, \quad (5)$$

$$\lambda_{эф} = \begin{cases} \lambda' \left(\frac{\omega_c}{\omega_c - \omega} \right)^q & \text{при } \omega < \omega_c \\ \lambda'' \left(\frac{\omega - \omega_c}{1 - \omega_c} \right)^p & \text{при } \omega > \omega_c \end{cases} \quad (6)$$

На основе сопоставления результатов экспериментальных исследований и данных, отвечающих отмеченным моделям теплопроводности, установлено, что рассмотренные модели эффективной среды адекватно описывают концентрационное поведение коэффициента теплопроводности только в определенных диапазонах концентраций наполнителя. Модели же перколяции обеспечивают адекватное прогнозирование теплопроводящих свойств композитов во всем диапазоне изменения содержания наполнителя. При этом модель Маклахлана (6) является несколько более предпочтительной.

Рассмотрена практически важная ситуация, отвечающая применению низкотеплопроводных полимерных нанокompозитов, полученных на основе метода смешения

компонентов в расплаве, для создания трубопроводов энергетических систем. Представлены данные для условий, когда к низкотеплопроводным композитам наряду с требованиями в отношении теплофизических характеристик предъявляются также требования в части механических свойств. На базе выполненных экспериментальных исследований показана возможность создания таких нанокompозитов на основе полиэтилена или полипропилена, наполненных УНТ или нанодисперсными частицами аэросила. Установлено, что при массовой доле последних до 2 % имеет место относительно незначительное повышение коэффициента теплопроводности (до $\lambda = 0,54$ Вт/(м·К)) и существенное возрастание модуля упругости при растяжении (до $E = 1,33$ ГПа).

Большое внимание в работе уделено экспериментально-теоретическим исследованиям закономерностей влияния методов получения высокотеплопроводных полимерных микро- и нанокompозитов на их теплофизические характеристики.

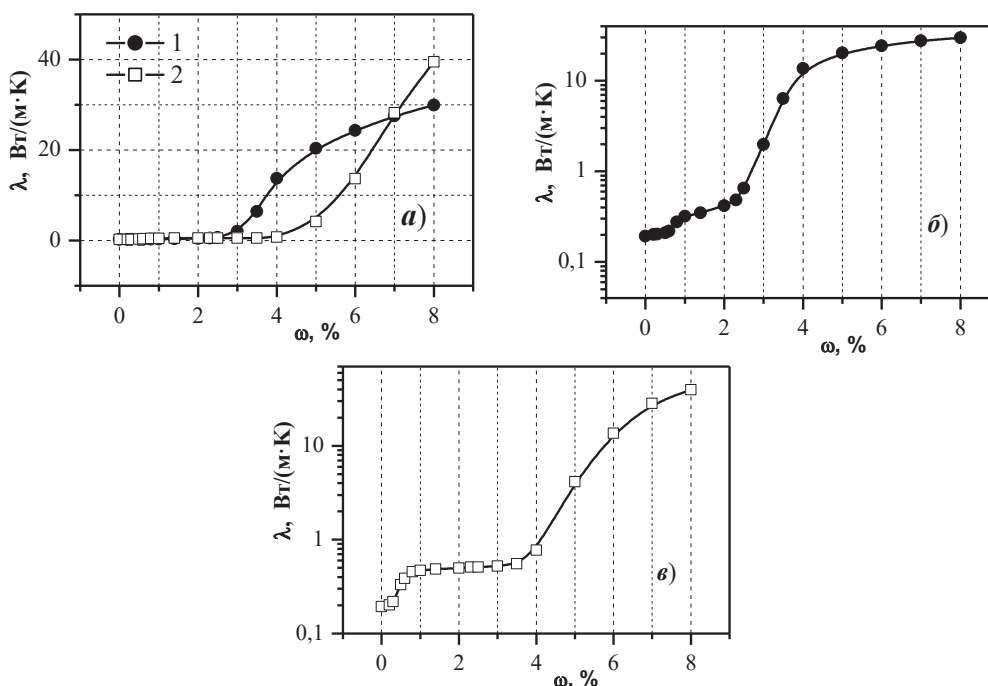


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности полимерных композиционных материалов на основе полиэтилена (б) и поликарбоната (в) от массовой доли углеродных нанотрубок: (а) – линейная шкала по оси ординат, (б, в) – логарифмическая шкала по оси ординат; различные полимерные матрицы: 1 – полиэтилен, 2 – поликарбонат.

При проведении экспериментов использовались два упомянутых выше наиболее широко распространенных в инженерной практике метода получения полимерных композитов:

- метод А, основанный на смешении находящихся в сухом виде компонентов с применением магнитной мешалки и ультразвукового диспергатора при дальнейшем горячем прессовании полученной композиции;
- метод В, базирующийся на смешении компонен-

тов в расплаве полимера с применением экструдера при дальнейшем придании композиту необходимой формы способом горячего прессования.

Показано, что при использовании метода В могут быть получены полимерные микро- и нанокompозиты с существенно более высокими, чем в случае метода А, значениями коэффициента теплопроводности λ . Установлен факт большей чувствительности полимерных композитов, наполненных УНТ, к методу их получения.

Обнаружено, что при использовании метода В величины массовой доли наполнителя, отвечающие резкому изменению λ – так называемые перколяционные пороги, смещаются в область меньших значений ω .

На основе проведенного сравнительного анализа рассмотренных методов получения полимерных микро- и нанокомпозитов сделан вывод о том, что каждый из методов имеет достаточно широкую область использования. Так, метод, основанный на смешении компонентов в сухом виде, оказывается более предпочтительным при относительно небольших объемах производства композитов, сравнительно малой массовой доле наполнителей, их относительно невысокой стоимости и пр. Метод, основанный на смешении компонентов в расплаве, обеспечивает лучшие показатели в случае широкомасштабного производства композитов при наполнении полимеров дорогостоящими наполнителями и т.д. При этом чем выше значение максимальной темпера-

туры эксплуатации композита $T_{\max}$, тем меньшими при прочих равных условиях оказываются преимущества данного метода.

Для изготовления теплообменных поверхностей различного назначения разработан типоряд 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. Исследованы возможности использования в качестве элементов данного типоряда частично кристаллических (полиэтилена, полипропилена, поликарбоната) и аморфного (полиметилметакрилата) полимеров, наполненных углеродными нанотрубками или микрочастицами меди либо алюминия. При построении указанного типоряда из множества композитов, отвечающих данному элементу ряда с заданным значением λ , выбирался один из соображений минимальной общей стоимости его компонентов.

Таблица 1. Характеристики полимерных микро- и нанокомпозитов разработанного типоряда материалов для теплообменных поверхностей

λ композита, Вт/(м·К)	Тип полимерной матрицы	Тип наполнителя	ω , %
Максимальная температура эксплуатации композита $T_{\max} = 390$ К			
20	ПЭ	Al	4,7
25	ПЭ	УНТ	3,4
30	ПММА	УНТ	2,8
35	ПММА	УНТ	3,2
40	ПММА	УНТ	3,7
45	ПММА	УНТ	4,4
50	ПММА	УНТ	5,6
55	ПММА	УНТ	7,3
57,5	ПММА	УНТ	8,6
Максимальная температура эксплуатации композита $T_{\max} = 425$ К			
20	ПП	Al	3,5
25	ПП	УНТ	2,8
30	ПП	УНТ	3,1
35	ПП	УНТ	3,4
40	ПП	УНТ	3,9
45	ПП	УНТ	4,8
50	ПП	УНТ	6,0
55	ПП	УНТ	7,5
Максимальная температура эксплуатации композита $T_{\max} = 470$ К			
20	ПК	УНТ	3,1
25	ПК	УНТ	4,0
30	ПК	УНТ	5,4
35	ПК	УНТ	6,5
40	ПК	УНТ	7,7
45	ПК	УНТ	9,0
49	ПК	УНТ	10,0

Выполнены экспериментальные исследования по определению температурных зависимостей коэффициентов теплопроводности указанных композитов. Установлено, что в рассматриваемых температурных интервалах, отвечающих диапазонам рабочих температур этих композитов, величины изменения значений их

коэффициентов теплопроводности зависят от типа полимерной матрицы и наполнителя, а также от массовой доли последнего. В частности, показано, что величины данного изменения являются более существенными при наполнении полимеров микрочастицами алюминия и достигают примерно 10 %.

Для полимерных микро- и нанокомпозитов с заданными теплопроводящими свойствами проведен сравнительный анализ данных об их составах, полученных с учетом и без учета температурных зависимостей коэффициентов теплопроводности. Установлено, что традиционный подход к определению таких составов по значениям коэффициентов теплопроводности композитов при температуре окружающей среды может приводить к недопустимым погрешностям.

По результатам проведенных исследований выполнена корректировка типоряда высокотеплопроводных полимерных микро- и нанокомпозитов с учетом температурной зависимости их коэффициентов теплопроводности. В табл. 1 представлены основные характеристики разработанного типоряда.

В работе особое внимание уделено анализу эффективности применения полимерных композитов для создания деталей и узлов теплоэнергетического оборудования.

Ниже в качестве примера приводятся соответствующие результаты, касающиеся использования данных композитов в котельных установках с системами утилизации теплоты дымовых газов. При этом рассмотрению подлежали возможности применения как высоко-, так и низкотеплопроводных композитов, характеризующихся разными диапазонами рабочих температур, значений коэффициентов теплопроводности, прочностными свойствами и пр.

Проведенный анализ показал, что разработанные полимерные микро- и нанокомпозиты могут использоваться для изготовления таких элементов указанных установок, как газоотводящие каналы, включая дымо-

вые трубы, различные соединительные трубопроводы, корпуса нейтрализаторов конденсата, теплообменные поверхности утилизаторов теплоты различного типа и др. Что касается указанных теплообменных поверхностей из полимерных композитов, то в работе исследованы особенности их использования при глубоком охлаждении дымовых газов в водогрейных и воздушогрейных утилизаторах теплоты, а также в комбинированных теплоутилизационных системах. Кроме того изучена специфика их применения в газоподогревателях, предназначенных для подсушивания дымовых газов после теплоутилизаторов с целью предотвращения конденсатообразования в газоотводящих трактах котельной установки.

Перспективность использования полимерных микро- и нанокомпозитов для изготовления указанных теплообменников, работающих в условиях воздействия агрессивного конденсата, который образуется при глубоком охлаждении дымовых газов, в большой мере связана с повышенной коррозионной стойкостью данных композитов. Кроме того последние, обладая близкими теплопроводящими свойствами к традиционным аналогам – коррозионностойким сталям, могут превосходить их по массогабаритным, ценовым показателям и пр.

Характеристики теплообменных поверхностей из полимерных микро- и нанокомпозитов сравнивались с соответствующими показателями для традиционно используемых в рассматриваемых ситуациях поверхностей. Данные сопоставления проводились при условии одинаковых теплогидравлических режимов работы теплообменных аппаратов, т.е. при одних и тех же теплопроизводительностях, диапазонах рабочих температур

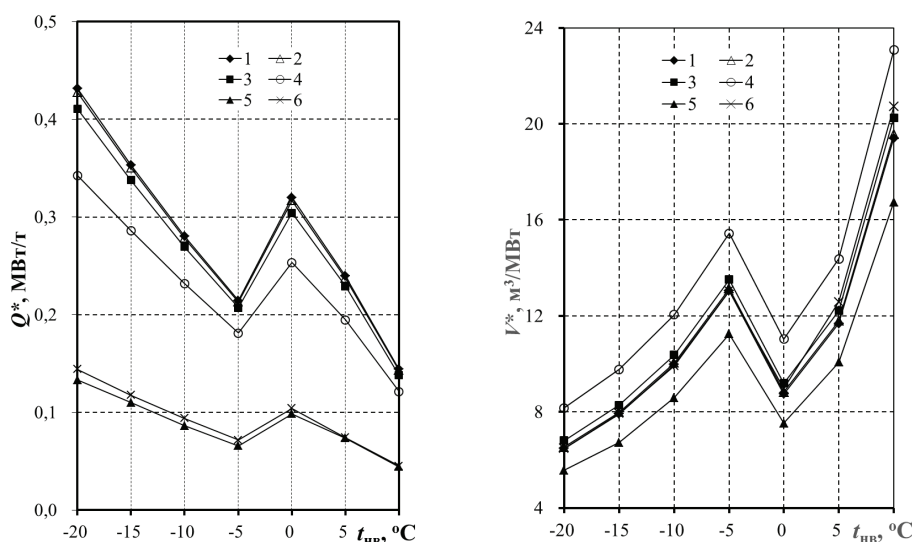


Рис. 2. Зависимость удельной теплопроизводительности (а) и удельного объема (б) воздушогрейного теплоутилизатора от температуры наружного воздуха при использовании теплообменных поверхностей в виде пакета пластин из полимерных микро- и нанокомпозитов с различными значениями коэффициента теплопроводности λ :
 1 – $\lambda = 30 \text{ Вт/(м·К)}$; 2 – $\lambda = 5 \text{ Вт/(м·К)}$; 3 – $\lambda = 1 \text{ Вт/(м·К)}$;
 4 – пластины из ненаполненного полимера (полиметилметакрилата) с $\lambda = 0,2 \text{ Вт/(м·К)}$;
 5, 6 – соответственно пластины и трубные пучки с КТП из нержавеющей стали.

и давлений, расходах теплоносителей и пр. При этом сравнительный анализ традиционных теплообменных поверхностей и поверхностей из рассматриваемых композитов выполнялся в широком диапазоне изменения нагрузки котлоагрегата и значений температур отходящих газов в номинальном режиме его работы.

В качестве основных показателей для сравнения эффективности теплообменных поверхностей использовались следующие: удельная теплопроизводительность (количество утилизированной теплоты на единицу массы теплообменной поверхности), относительный объем и себестоимость (объем и себестоимость поверхности нагрева на единицу утилизированной теплоты) и др.

Что касается сопоставления характеристик теплообменных поверхностей из полимерных композитов и традиционно используемых поверхностей, то здесь для различных типов теплоутилизационных систем рассмотрению подлежали разные конфигурации этих поверхностей и используемые для их изготовления материалы. Так, для водогрейных теплоутилизаторов в качестве традиционных теплообменников исследовались пучки гладких и оребренных труб из нержавеющей стали, а также пучки оребренных биметаллических труб (стальная основа – оребрение из алюминия). Для воздухогрейных теплоутилизаторов рассматривались традиционно используемые пакеты пластин и пучки труб с кольцевыми турбулизаторами потока (КТП) из нержавеющей стали.

Требуемый для той или иной теплообменной поверхности полимерный композит выбирался, во-первых, из условия соответствия заданному диапазону рабочих температур. И кроме того необходимые теплопроводящие свойства композита находились по оптимальным значениям одной или нескольких характеристик теплообменных аппаратов, которые в рамках данной задачи считались определяющими.

Ниже на рис. 2, 3 в качестве примера приводятся

данные расчетных исследований для воздухогрейного теплоутилизационного оборудования котлоагрегатов. Рассмотрению подлежали традиционно используемые пакеты пластин и пучки труб с КТП из нержавеющей стали и пакеты пластин из полимерных микро- и нано-композитов. Толщина пластин из нержавеющей стали составляла 2 мм, из композитов – 4 мм. Для трубных пучков применялись трубы с наружным диаметром 31 мм и внутренним 25 мм. Моделировались различные нагрузки котла, отвечающие температурам окружающей среды $t_{\text{нв}}$, значения которых определялись по теплосетевому графику.

На рис. 2 для указанных теплообменных поверхностей представлены зависимости удельной теплопроизводительности и относительного объема воздухогрейного теплоутилизатора от температуры окружающего воздуха при температуре отходящих газов котла равной 160 °С. Здесь рассмотрена ситуация, когда в качестве полимерных композитов использовался полиметилметакрилат, наполненный УНТ либо микрочастицами алюминия:

при $\lambda = 30 \text{ Вт/(м·К)}$ – УНТ с $\omega = 2,8 \%$;

при $\lambda = 5 \text{ Вт/(м·К)}$ – УНТ с $\omega = 2,1 \%$ либо Al с $\omega = 3,0 \%$;

при $\lambda = 1 \text{ Вт/(м·К)}$ – УНТ с $\omega = 1,6 \%$ или Al с $\omega = 2,5 \%$.

В целях сопоставления приведены также данные, отвечающие ненаполненному полимеру – полиметилметакрилату с $\lambda = 0,2 \text{ Вт/(м·К)}$. Как видно из рис. 2, а, удельная теплопроизводительность теплоутилизаторов с поверхностями нагрева из полимерных композиционных материалов существенно (более чем в 3 раза) превосходит соответствующий показатель для поверхностей из нержавеющей стали во всем диапазоне нагрузок котла. Это связано в основном с низкой плотностью полимерных композитов, которая более чем в 6 раз меньше плотности нержавеющей сталей. Обращает на себя внимание тот факт, что изменение коэффициента теплопроводности композитов в диапазоне $\lambda = 1 \dots 30 \text{ Вт/(м·К)}$

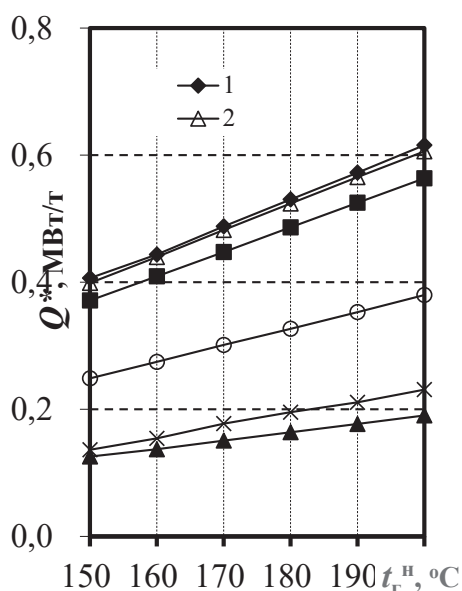


Рис. 3. Зависимость удельной теплопроизводительности воздухогрейного теплоутилизатора от температуры отходящих газов в номинальном режиме при использовании теплообменных поверхностей в виде пакета пластин из полимерных микро- и нанокомпозитов с различными значениями коэффициента теплопроводности λ :
 1 – $\lambda = 30 \text{ Вт/(м·К)}$; 2 – $\lambda = 5 \text{ Вт/(м·К)}$;
 3 – $\lambda = 1 \text{ Вт/(м·К)}$;
 4 – пластины из ненаполненного полимера (полиметилметакрилата) с $\lambda = 0,2 \text{ Вт/(м·К)}$;
 5, 6 – соответственно пластины и трубные пучки с КТП из нержавеющей стали

оказывает незначительное влияние на удельную теплопроизводительность утилизатора теплоты. Последняя снижается менее чем на 5 % при уменьшении λ в указанном диапазоне. Что же касается ненаполненных полимеров, то, как следует из полученных данных, их применение также обеспечивает значительное повышение удельной теплопроизводительности теплоутилизаторов в сравнении с традиционным использованием поверхностей из нержавеющей стали.

Согласно данным, приведенным на рис. 2, б, относительный объем воздухогрейных теплоутилизаторов из рассматриваемых полимерных микро- и нанокомпози- тов оказывается заметно большим, чем в случае пластинчатых теплоутилизаторов из нержавеющей стали, и близким по величине к ситуации использования пучков труб с КТП. То есть по компактности теплоутилизаци- онного оборудования пластинчатые теплообменники из полимерных композитов в рассматриваемых условиях несколько проигрывают традиционным теплооб- менни- кам из нержавеющей стали.

Рис. 3 иллюстрирует зависимость удельной тепло- производительности теплоутилизаторов от температуры t_r^n отходящих газов котла в номинальном режиме для рассматриваемых типов теплообменных поверхностей. Как видно, указанная теплопроизводительность возрастает с повышением температуры t_r^n . При этом для теплообменных поверхностей из полимерных композитов имеет место большая чувствительность Q^* к изменению температуры t_r^n .

Выводы

На основе выполненного комплекса эксперимен- тальных и теоретических исследований установлены закономерности изменения теплофизических характе- ристик и особенности структурообразования ряда высо- ко- и низкотеплопроводных полимерных микро- и нанокомпози- тов для различных деталей и узлов тепло- энергетического оборудования. Представлены соответ- ствующие данные, отвечающие различным методам получения композитов, и проведено их сопоставле- ние. Выполнен анализ возможностей использования для определения теплопроводящих свойств разраба- тываемых микро- и нанокомпози- тов методов теории эффективной среды и теории перколяции. Изучены теплофизические и механические свойства низкотепло- проводных композитов с улучшенными прочностными характеристиками, ориентированных на изготовление трубопроводов различного назначения.

По результатам выполненных исследований разра- ботан типоряд высокотеплопроводных композитов с ко- эффициентом теплопроводности, изменяющимся от 20 до 60 Вт/(м·К). На основе исследования температурной зависимости коэффициентов теплопроводности данных композитов выполнена корректировка указанного типо- ряда.

Изучены особенности использования данных ком- пози- тов при глубоком охлаждении дымовых газов в во- догрейных, воздухогрейных утилизаторах теплоты и в комбинированных теплоутилизационных системах. Вы-

полнено сравнение характеристик теплообменных по- верхностей из полимерных композитов с соответству- ющими показателями для традиционно используемых поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kim H. Thermal conductivity of polymer composites with the geometrical characteristics of graphene nanoplatelets // H. Kim, H. Bae, Han Z., J. Yu, S. Kim / Scientific Reports. – 2016. – V.6. – P.101 – 109.
2. King J.A. Accelerated hydrothermal aging of cycloaliphatic epoxy/graphene nanoparticle composites // King J.A., Tomasi J.M., Helman I.D., Pisani W.A., Odegard G.M. / Polymer Degradation and Stability. – 2016. – V.133. – P. 131 – 135.
3. Korolovych V.F. Assembly of amphiphilic hyperbranched polymeric ionic liquids in aqueous media at different pH and ionic strength // Korolovych V.F., Ledin P.A., Shevchenko V.V., Bulavin L.A., Tsukruk V.V. / Macromolecules. – 2016. – V.49 (22). – P. 8697–8710.
4. Lipatov Yu.S. In situ polymer nanocomposites: Effect of nanoparticles on the interfacial region // Yu.S. Lipatov, L.F. Kosyanchuk, N. V. Yarovaya / Composite Interfaces. – 2006. – V.13, №7. – P. 647 – 655.
5. Manilo M. Mechanism of Methylene Blue adsorption on hybrid laponite-multi-walled carbon nanotube particles // M. Manilo, N. Lebovka, S. Barany / Journal of Environmental Sciences. – 2016. – V.42. – P. 134 – 141.
6. Privalko V.P. Polyimides Reinforced with the Sol-Gel Derived Organosilicon Nanophase: Structure – Property Relationships // Privalko V.P., Shantalii T.A., Privalko E.G. / Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics. – 2007. – V.46. – P. 87 – 95.
7. Shilov V.V. Solgel synthesis and investigation of hybrid organicinorganic borosilicate nanocomposites // Shilov V.V., Tsvetkova I.N., Gomza Yu.P., Khashkovskii S.V. / Glass Physics and Chemistry. – 2005. – V.32, №2. – P. 218 – 227.
8. Wunderlich B. Termination of crystallization or ordering of flexible, linear macromolecules // Wunderlich B. / Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2012. – V.109, №3. – P.1117 – 1132.
9. Zhang D. Analysis of crystallization property of LDPE/Fe3O4 nanodielectrics based on AFM measurements // Zhang D., Wang X., Song W., Han B., Lei Q.-Q. / Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2017. – V.28, №3. – P. 3495 – 3499.
10. Zhang D. Effects of structural differences of graphene and the preparation strategies on the photocatalytic activity of graphene–TiO2 composite film // Liu Y., Zhang D. / Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2017. – V. 28, №6. – P. 4965 – 4973.
11. Долинский А.А. Влияние методов получения полимерных микро- и нанокомпози- тов на их теплофизи- ческие свойства / А.А. Долинский, Н.М. Фиалко, Р.В. Динжос, Р.А. Навродская // Промышленная теплотехни- ка. – 2015. – № 4. – С. 5 – 13.
12. Долинский А.А. Теплофизические свойства низ- котеплопроводных полимерных нанокомпози- тов для

элементов энергетического оборудования / А.А. Долинский, Н.М. Фиалко, Р.В. Динжос, Р.А. Навродская // Промышленная теплотехника. – 2015. – № 6. – С. 5 – 15.

13. Долинский А.А. Теплофизические характеристики высокотеплопроводных полимерных микро- и нанокомпозитов / А.А. Долинский, Н.М. Фиалко, Р.В. Динжос, Р.А. Навродская // Промышленная теплотехника. – 2015. – №5. – С.5-14.

14. Долинский А.А. Температурные зависимости коэффициентов теплопроводности полимерных микро- и нанокомпозиционных материалов / А.А. Долинский, Н.М. Фиалко, Р.В. Динжос, Р.А. Навродская // Промышленная теплотехника. – 2016. – № 1. – С. 5 –15.

15. Фиалко Н.М. Теплофизические основы создания полимерных микро- и нанокомпозитов для элементов энергетического оборудования / Н.М. Фиалко, Р.В. Динжос // Промышленная теплотехника. – 2015. – № 7. – С. 172-175.

16. Вундерлих Б. Физика макромолекул. Т.2: Зарождение, рост и отжиг кристаллов / Вундерлих Б.. – М.:

Мир, 1979. – 574 с.

17. Долинский А.А. Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой теплоэнергетики / А.А. Долинский, Н.М. Фиалко, Р.А. Навродская, Г.А. Гнедаш // Промышленная теплотехника. – 2014. – № 4. – С. 27–36.

18. Фиалко Н.М. Особенности методики расчета поверхностных теплоутилизаторов конденсационного типа / Н.М. Фиалко, В.И. Гомон, Р.А. Навродская, В.Г. Прокопов, Г.А. Пресич // Промышленная теплотехника. – 2000. – № 2. – С. 49–53.

19. Kirkpatrick S. Percolation and Conduction / Scott Kirkpatrick. – Reviews of modern physics. – 1973. – Vol. 45, №4. – P. 574-585.

20. McLachlan D.S. The correct modelling of the second order terms of the complex ACconductivity results for continuum percolation media, using a single phenomenological equation / D.S. McLachlan, C. Chiteme, W.D. Heiss, Junjie Wu. – Physica B. – 2003. – Vol. 338. – P. 256-260.

**POLYMER MICRO- AND NANOCOMPOSITES
AS OBJECTS OF THERMOPHYSICAL
RESEARCH FOR ELEMENTS OF HEAT-POWER
ENGINEERING EQUIPMENT**

Fialko N.M.¹, Dinzhos R.V.², Navrodskaia 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., Mykolaiev, 540030, Ukraine

Key words: polymer micro- and nanocomposites, thermophysical properties, heat-power equipment.

The results of studies of the regularities of the change in thermophysical characteristics and crystallization mechanisms for a wide range of polymer micro- and nanocomposites oriented on the production of elements of heat-and-power equipment are presented. The corresponding data corresponding to various methods for the preparation of composites are given and their comparison is made. A series of high-conductivity composites with a coefficient of heat conductivity varying from 20 to 60 W/(m·K) has been developed. Thermophysical and mechanical properties of low-heat-conducting composites with improved strength properties, oriented to the production of tube lines for various purposes, were studied. The specifics of the use of polymer micro- and nanocomposites for deep cooling of flue gases in water-heating, air-heating heat utilizer units and in combined heat utilizer systems are investigated. A comparison of the characteristics of heat exchange surfaces from polymer composites with the corresponding parameters for traditionally used surfaces is made.

1. Kim H., Bae H., Han Z., Yu J., Kim S. Thermal conductivity of polymer composites with the geometrical characteristics of graphene nanoplatelets, *Scientific Reports*, 2016, V.6, p.101 – 109. (Eng.)

2. King J.A., Tomasi J.M., Helman I.D., Pisani W.A., Odegard G.M. Accelerated hydrothermal aging of cycloaliphatic epoxy/graphene nanoparticle composites, *Polymer Degradation and Stability*, 2016, V.133, p. 131 – 135. (Eng.)

3. Korolovych V.F., Ledin P.A., Shevchenko V.V., Bulavin L.A., Tsukruk V.V. Assembly of amphiphilic hyperbranched polymeric ionic liquids in aqueous media at different pH and ionic strength, *Macromolecules*, 2016, V.49 (22), p. 8697–8710. (Eng.)

4. Lipatov Yu.S., Kosyanchuk L.F., Yarovaya N.V. In situ polymer nanocomposites: Effect of nanoparticles on the interfacial region, *Composite Interfaces*, 2006, V.13, №7, p. 647 – 655. (Eng.)

5. Manilo M., Lebovka N., Barany S. Mechanism of Methylene Blue adsorption on hybrid lapo-nite-multi-walled carbon nanotube particles, *Journal of Environmental Sciences*, 2016, V.42, p. 134 – 141. (Eng.)

6. Privalko V.P., Shantalii T.A., Privalko E.G. Polyimides Reinforced with the Sol-Gel Derived Organosilicon Nanophase: Structure – Property Relationships, *Journal of Macromolecular*

Science, Part B: Physics, 2007, V.46, p. 87 – 95. (Eng.)

7. Shilov V.V., Tsvetkova I.N., Gomza Yu.P., Khashkovskii S.V. Solgel synthesis and investigation of hybrid organic-inorganic borosilicate nanocomposites, *Glass Physics and Chemistry*, 2005, V.32, №2, p. 218 – 227. (Eng.)

8. Wunderlich B. Termination of crystallization or ordering of flexible, linear macromolecules, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012, V.109, №3, p.1117 – 1132. (Eng.)

9. Zhang D., Wang X., Song W., Han B., Lei Q.-Q. Analysis of crystallization property of LDPE/Fe₃O₄ nanodielectrics based on AFM measurements, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, V.28, №3, p. 3495 – 3499. (Eng.)

10. Liu Y., Zhang D. Effects of structural differences of graphene and the preparation strategies on the photocatalytic activity of graphene-TiO₂ composite film, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, V. 28, №6, p. 4965 – 4973. (Eng.)

11. Dolinsky A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodskaia R.A. Influence of methods of obtaining polymeric micro- and nanocomposites on their thermophysical properties, *Industrial heat engineering*, 2015, № 4, p. 5 – 13. (Rus.)

12. Dolinsky A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodskaia R.A. Thermophysical properties of low-conductivity polymer nanocomposites for power equipment components, *Industrial heat engineering*, 2015, № 6, p. 5 – 15. (Rus.)

13. Dolinsky A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodskaia R.A. Thermophysical characteristics of high-conductivity polymeric micro- and nanocomposites, *Industrial heat engineering*, 2015, № 5, p. 5–14. (Rus.)

14. Dolinsky A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodskaia R.A. Temperature dependences of thermal conductivity coefficients of polymer micro- and nanocomposite materials, *Industrial heat engineering*, 2016, № 1, p. 5 –15. (Rus.)

15. Fialko N.M., Dinzhos R.V. Thermophysical foundations for the creation of polymer micro- and nanocomposites for elements of power equipment, *Industrial heat engineering*, 2015, № 7, p. 172–175. (Rus.)

16. Wunderlich B. Physics of macromolecules. T.2: Origin, growth and annealing of crystals. Moscow: Mir, 1979, 574 p. (Rus.)

17. Dolinsky A. A., Fialko N.M., Navrodskaia R.A., Gnedash G.A. The basic principles of creating heat recovery technologies for segregate heat power plants, *Industrial heat engineering*, 2014, № 4, p. 27–36. (Rus.)

18. Fialko N.M., Gomon V.I., Navrodskaia R.A., Prokopov V.G., Presich G.A. Specifics of the calculation procedure for surface heat exchangers of condensation type, *Industrial heat engineering*, 2000, № 2, p. 49–53. (Rus.)

19. Kirkpatrick S. Percolation and Conduction, *Reviews of modern physics*, 1973, Vol. 45, №4, p. 574 –585. (Eng.)

20. McLachlan D.S., Chiteme C., Heiss W.D., Junjie Wu. The correct modelling of the second order terms of the complex AC conductivity results for continuum percolation media, using a single phenomenological equation, *Physica B*, 2003, Vol. 338, p. 256–260. (Eng.)

Получено 05.04.2017
Received 05.04.2017

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКОНОМИКИ УКРАИНЫ – МИССИЯ И ОСНОВНОЙ ПРИОРИТЕТ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Басок Б.И., член-корреспондент НАН Украины, **Базеев Е.Т.,** канд. техн. наук

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

Представлено обговорювані науковою громадськістю, у вигляді стратегій і експертних висновків, можливі тренди розвитку української енергетики для підвищення енергоефективності економіки України. Підкреслено роль енергоефективності в структурі енергетичних балансів – як основного потенційного екологічно чистого енергоресурсу.

Представлены обсуждаемые научной общественностью, в виде стратегий и экспертных заключений, возможные тренды развития украинской энергетики для повышения энергоэффективности экономики Украины. Подчеркнута роль энергоэффективности в структуре энергетических балансов – как основного потенциального экологически чистого энергоресурса.

Presented are the possible trends of development of the Ukrainian energy industry for improving the energy efficiency of Ukraine's economy, discussed by scientific community in the form of strategies and expert opinions. The role of improving energy efficiency in the structure of energy balances is emphasized as the main potential ecologically clean energy resource.

Библ. 20, рис. 5.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергосбережение, теплообеспечение, экономика, энергетическая стратегия, энергоёмкость, энергетическая политика, энергетические директивы ЕС.

Снижение промышленного производства и, соответственно, уменьшение спроса на энергоресурсы и энергоносители в течении последних 25 лет создавали в Украине некоторую иллюзию успокоенности и уверенности в том, что в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК) страны ситуация относительно благополучная. При этом основные фонды ТЭК уже находятся на пределе физического и морального износа. Иллюстрацией такого отношения являлись периодические попытки в течение 20 лет, начиная с 1996 года, разработать (в формате энергетических стратегий) прогноз научно-технического развития отраслей ТЭК.

Первая энергетическая программа Украины на период до 2010 года была принята в виде Закона Украины в 1996 году [1]. Последующие варианты стратегий 2006 года и 2013 года были одобрены распоряжениями Кабинета Министров Украины [2, 3].

Проект “Энергетическая стратегия Украины на период до 2035 года” (ЭС-35), подготовленный в 2014 году Национальным институтом стратегических исследований, и проект “Новая энергетическая стратегия на период до 2020 года: безопасность, энергоэффективность, конкуренция” (НЭС-20), подготовленный в 2015 году Центром Розумкова, до сих пор проходят только общественное обсуждение. Ни одна из принятых стратегий не достигла своих прогнозируемых индикативных целей и показателей.

Отметим, что энергетические стратегии разрабатывались в сложных выходных условиях неопределённости многих базовых факторов: перспектив развития страны; геополитической турбулентности; финансовых мировых кризисов; скачкообразных изменений мировых цен на нефть; повышения требований по улучшению экологии планеты; появления новых рисков и вызовов. В этих условиях трудно было ожидать достижения основных прогнозируемых индикативных це-

лей стратегий на достаточно продолжительный период (20...25 лет). Возможно, этим обстоятельством была вызвана необходимость уделить внимание коротким (до 5 лет) более конкретным планам (программным заданиям) с мероприятиями, направленными на повышение энергоэффективности производств как в секторах ТЭК так в других секторах экономики, что и отражено в проекте (НЭС-20) и в проекте “Среднеотраслевого плану приоритетних дій Уряду до 2020 року”, включающим раздел “підвищення енергетичної незалежності” [4]. Заметим, что в последнее время в Украине были приняты и запущены в реализацию два национальных плана – Национальный план действий по возобновляемой энергетике до 2020 г. и Национальный план повышения энергоэффективности до 2020 г.

В упомянутых выше документах термины и словосочетания энергоэффективность, энергосбережение, экономное, рациональное использование энергии зачастую отождествляются и трактуются, как само собою разумеющееся, что речь идёт об одном и том же, а именно: экономии энергии. Но энергоэффективность и энергосбережение – это разные по смыслу понятия.

Энергоэффективность – характеристика, отражающая отношение какого либо полезного эффекта (производство материальных ценностей, оказание услуг, проведение разного вида работ с использованием энергоресурсов) к затратам энергетических ресурсов в целях получения такого эффекта (И.А. Башмаков, Центр энергетической эффективности (ЦЭНЭФ-XXI, г. Москва), [5]). Энергоэффективность характеризует эффект от использования единицы энергии и измеряется в относительных единицах (положительный эффект/Дж) и имеет идеальным результатом, например, для теплоснабжения – это полное без потерь использование первичной энергии на создание надлежащего теплового режима комфорта в зонах пребывания человека. Энергоэффек-

тивность, как правило, показатель, обратно пропорциональный энергоёмкости производства продукта.

Энергосбережение – это реализация организационных, правовых, технических, технологических, экономических и иных мер, направленных на уменьшение объема используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования (в том числе объема произведенной продукции, выполненных работ, оказанных услуг) [6]. Важно подчеркнуть: "существующего полезного эффекта", иначе простое прекращение подачи теплоносителя для отопления или электроэнергии вплоть до отключения можно отнести к мероприятию "энергосбережение". Энергосбережение измеряется в абсолютных единицах (т у. т., Гкал, Дж и др.). В ныне действующем и достаточно устаревшем законе Украины об энергосбережении [7] приведена несколько иная трактовка термина «энергосбережение», а именно: "енергозбереження" – діяльність (організаційна, наукова, практична, інформаційна), яка спрямована на раціональне використання та економне витрачання первинної та перетвореної енергії і природних енергетичних ресурсів в національному господарстві і яка реалізується з використанням технічних, економічних та правових методів.

Дефицит энергии, случающийся на временных горизонтах (в периоды повышенных темпов экономического роста), покрывается в значительной степени вовлечением в энергетический баланс такого скрытого резерва как повышение энергоэффективности. В развитых странах энергоэффективность обеспечивала 60...65 % их экономического роста. В результате энер-

гоёмкость национального дохода снижалась в среднем в мире на 18 %, в развитых странах – на 21...22 %. Эффективность инвестиций в энергоэффективность выше в 10...15 раз, чем эффективность вложений в поддержание и в увеличение энергоресурсов и энергоносителей [8].

В современной мировой энергетике просматриваются новые тенденции, определяющие возрастание к середине XXI века роли трёх факторов: энергоэффективности, нетрадиционных источников энергии (в т. ч. возобновляемых и экологически чистых) и связанной с ними распределённой генерации, так называемыми интеллектуальными сетями передачи электроэнергии [9]. Энергетические эксперты начали оперировать современными понятиями: «новая энергетика», «чистая энергетика», «новая энергия», «интеллектуальная энергия», «цифровая энергия», биллинг, smart-системы, grid-технологии, аддитивные технологии, «облачные» технологии, технологии big data. Кроме новых дефиниций появились и новые требования к классическим процессам энергогенерации, например, высокоэффективная когенерация (которая обеспечивает первичную экономию энергии по меньшей мере в 10 % по сравнению с раздельным производством тепла и электроэнергии или маломасштабная и микрогенерация); "эффективное централизованное теплоснабжение и охлаждение" (означает центральное теплоснабжение или охлаждение с помощью, по меньшей мере, 50 % возобновляемых источников энергии, 50 % отработанного тепла, 75 % тепла от когенерации или 50 % от комбинации указанных энергии и тепла) [10].

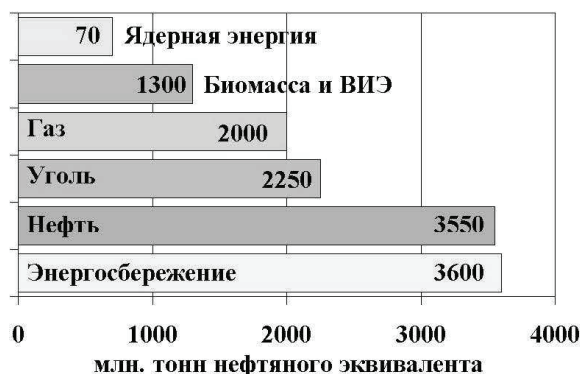


Рис. 1. Состав энергоресурсов в мировом балансе [11].

К началу XXI века энергоэффективность стала одним из основных энергоресурсов в энергетическом балансе мира (рис. 1) и Европейского сообщества (рис. 2). В энергобалансе Украины этот энергоресурс пока ещё не включён в должной мере (рис. 3). В литературе [12] появился уже термин, характеризующий повышение энергоэффективности – «негаджоуль»: него – отрицаю (латин.), т.е. это как бы «виртуальные» джоули. Поскольку «негаджоули», вовлечённые в энергобаланс, не добываются из месторождений, не извлекаются из окружающей среды и они, естественно, не претерпевают никаких преобразований, то этот энергоресурс может быть отне-



Рис. 2. Энергосбережение («негаджоули») – один из основных энергоресурсов в балансе ЕС [12].

сён к экологически абсолютно чистым энергоресурсам.

Как видно из рис. 1 и 2, энергоресурсы в виде «негаджоулей» могут быть соизмеримы с другими энергоресурсами в структурном энергобалансе мира и Европы и, в частности, могут быть равны (рис. 1) или даже превышать (рис. 2) объёмы использования нефти.

Обострившаяся ситуация в украинской энергетике, в частности, импортозависимость от поставок газа и нефтепродуктов, недопоставки антрацита, отсутствие полноценных рыночных отношений в энергетике и др. негативные явления, углубила проблему диверсификации энергоресурсов. Основные пути решения находят-

ся в вовлечении в энергобаланс других традиционных энергоресурсов, в то время как всё ещё остаётся мало-заметным и проигнорированным такой энергоресурс как негаджоули. Опыт работы по повышению энергоэффективности недостаточно систематизируется и пропагандируется, нет банка предлагаемых инновационных технологий и их иерархического ряда для выбора наиболее оптимальных. Игнорирование повышения энергоэффективности – это снижение экономического роста, угроза энергетической безопасности, снижение конкурентоспособности промышленности и инвестиционной привлекательности, повышения уровня бедности, повышение уровня загрязнения окружающей среды

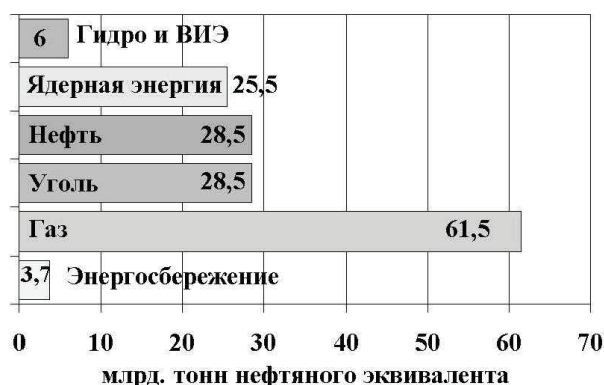


Рис. 3. Структурный баланс энергоресурсов в Украине [13, 14].

По данным ЦЭНЭФ–XXI в 1973-2011 годах за счёт повышения энергоэффективности было обеспечено более половины прироста потребности человечества в энергии. В эти годы мировой ВВП вырос в 3,3 раза, а потребление первичной энергии в 2,1 раза. Если бы энергоёмкость ВВП оставалась бы на постоянном уровне 1973 года, то прирост потребления энергии составил бы 14,1 млрд. т н.э., а фактически он составил 7 млрд. т н.э. Следовательно, вследствие повышения энергоэффективности было обеспечено половину прироста – 7 млрд. т н.э. (рис. 5). В эти же годы приросты топлива и энергии составили (млрд. т н.): нефть – 135; уголь – 2,28; природный газ – 1,81; ядерное топливо – 0,62 [5].

Для адекватного и полного представления стратегических направлений эволюции энергетики Украины важно располагать стратегией социально-экономического развития всей страны с учетом мировых тенденций развития экономических процессов. Документами последнего времени в этой сфере есть «Стратегия устойчивого развития «Украина - 2020» [16] и программа «Форсайт» [17].

С помощью методологии сценарного планирования и swot-анализа 50 экспертов провели уточнение восьми сценариев социально-экономического развития Украины вплоть до 2030 года [17]. С использованием дельфи- и SWOT-методов анализа проведено новое ши-

и карбонизации экономики.

Совсем иное отношение к этому энергоресурсу в мире. Роль повышения энергоэффективности ярко видна при анализе динамики прироста ВВП и потребления первичных энергоресурсов (рис. 4). Например, в Германии практически отсутствует зависимость темпа экономического роста от производства энергоресурсов (больше того, имеется тенденция к снижению потребления энергоресурсов на 5 %), в то время как в Украине за период с 2000 года по 2007 год темпы роста объёма ВВП и общего производства первичных топливно-энергетических ресурсов составили соответственно 164 % и 127 %.

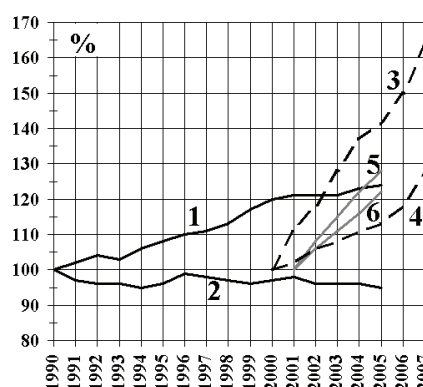


Рис. 4. Темпы экономического роста ВВП (1, 3, 5 линии) и потребления первичной энергии (2, 4, 6 линии) Германии [15] (1, 2 линии), Украины [14] (3, 4) и России [15] (5, 6).

рокомасштабное экспертное исследование социально-экономического сегмента общества, выполнена оценка наличия человеческого капитала в стране, способного осуществить прогрессивные преобразования, и выстроено пятьдесят главных действий власти в форме стратегии социально-экономического развития в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Из восьми сценариев [17] желательными для Украины стали сценарий 1 («оптимистичный» до 2020 года) и сценарий 5 («сбалансированное развитие» до 2030 года).

Главную цель социально-экономического развития Украины на ближайшие 10 лет сформулировано следующим образом: «к 2025 году удвоить ВВП страны и довести его до 400...500 млрд. долл. США, сохраняя стабильность своих общественных и культурных систем и обеспечивая жизнеспособность собственной биосферы и ее способность самовозобновляться» [17].

Одним из девяти главных драйверов (кластеров), которые могут обеспечить успешную интеграцию страны в международную кооперацию труда на указанных временных горизонтах, является драйвер «новая энергетика». Ожидаемый вклад этого драйвера в ВВП страны оценивается в 5 % к 2020 году и в 8 % до 2025 года.

Представлены топ-5 критических факторов, тормозящих развитие экономики на временных горизонтах до 2020 и 2030 года. Среди указанных факторов важным

является энергоемкость ВВП Украины (кг н.э./долл. США). Она должна быть снижена с 0,328 (2016) до 0,28 (2020) и 0,18 (2030). Вышеуказанная высокая энергоемкость ВВП является слабым фактором (индикатором). Количественное значение этого фактора по шкале Миллера (1-7) составляет 6 (2020) и 4,5 (2030) соответ-

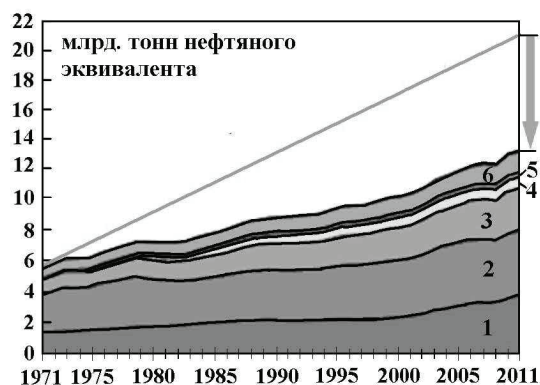


Рис. 5. Структурный мировой энергобаланс, данные МЭА, приведенные в [5]. Обозначения:
 1 – уголь, 2 – нефть, 3 – природный газ;
 4 – атомная энергия; 5 – гидроэнергия;
 6 – биотопливо и отходы,
 стрелка – энергобережение.

ственно. К слабым факторам, связанных с энергетикой, относятся также: импортозависимость, высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха, нерациональное обращение с отходами, выбросами и сбросами, значительная карбоновая интенсивность экономики.

Согласно основной вышеуказанной цели, действия власти и общества должны быть направлены на: минимизацию топ-5 тормозящих факторов, в частности, «энергоемкости ВВП»; активизацию главных драйверов экономики Украины; подготовку в необходимых объемах и с необходимыми компетенциями человеческого капитала, способного к реализации вышеупомянутых преобразований.

Что касается минимизации «энергоемкости ВВП», то ее уменьшение должно быть в 3...5 раз, с переходом экономики Украины на «интеллектуальные» технологии, как менее энергоемкие, более высокорентабельные, экологически чистые.

Последовательность действий власти, направленных на активизацию главных кластеров экономики Украины, связанных, в частности, с энергетикой:

- внесение принципиальных изменений в энергетической политике Украины;
- широкое внедрение возобновляемой и альтернативной энергетики;
- законодательное закрепление особого характера возобновляемых источников энергии;
- разработка и внедрение программы модернизации энергетической отрасли;
- полномасштабное введение оптового рынка электроэнергии, газа, угля и тепловой энергии.

Определены сильные факторы и 10 драйверов по

ускоренному развитию экономики Украины [17]. Относительно энергетики к сильным факторам можно отнести наличие сырьевой и ресурсной базы для атомной, возобновляемой энергетики и точного приборостроения, образованного трудоспособного корпуса специалистов-энергетиков.

Итак, одним из главных тормозящих факторов для развития экономики страны является высокая энергоемкость ВВП. Для снижения энергоемкости есть только один безальтернативный путь – повысить энергоэффективность секторов топливно-энергетического комплекса и всех отраслей экономики. Поэтому в Европе и в мире уже давно пришли к выводу, что энергоэффективность – это главное направление при потреблении энергоресурсов и энергоносителей. Одновременно энергоэффективность – это главный потенциальный, экологически чистый энергоресурс.

Подводя промежуточный итог, следуют подчеркнуть современные устойчивые тенденции развития мировой энергетики:

- глобальное использование энергоэффективности и энергосбережения;
- устойчивое развитие общества, включая использование возобновляемой и альтернативной энергетики и повышение ее декарбонизации;
- информатизация и интеллектуализация энергетики [18, 19].
- смещение акцентов внимания с энергогенерации на эффективное распределение и, особенно, на конечного потребителя энергоресурсов – населения и экономику страны (мира). Переход от «рынка продавца» к «рынку покупателя». Изменение статуса потребителя, возможность конечного пользователя управлять энергосистемой.

На сегодня в ведущих странах формируется новая энергетическая философия, основные черты которой: энергоэффективность; интеллектуальные энергетические системы, построенные согласно концепции Smart Grid; децентрализация энергетики; новые источники энергии. Более того, в некоторых странах начался переход к энергетике 4-го инвестиционного цикла, а именно от модели «Энергоэффективность +» (ренессанс существующей энергетики (атомная, угольная, ВИЭ) при демпфировании ее негативных сторон; запуск программ энергоэффективности второй волны (on-line управления потреблением), CCS, усиление в балансе возобновляемой энергетики и т.д.) к концепции модели «Рынок мощности» (либерализация рынка в сфере генерации, рассредоточенная генерация; Smart Grid в версии «активные сети», вместо рынка энергетических услуг и топлива – рынок энергетических мощностей и выход на него «покупателя - продавца» (активные дома, электро-транспорт и т.п.); перестройка городов) [20].

Ниже представлены ретроспективный взгляд по разработке политики повышения энергоэффективности при потреблении энергоресурсов. Снижение потребления энергии и устранения потерь энергии приобретает все большее значение для мира и, в частности для ЕС. В 2007 году лидеры ЕС решили снизить целевой пока-

затель годового потребления энергии Европейского Союза для 2020 году на 20 %. Мероприятия по повышению энергоэффективности все чаще проявляются в качестве средства не только достижения устойчивого энергоснабжения, сокращения выбросов парниковых газов, повышения безопасности поставок и снижения затрат на импорт, но и содействия конкурентоспособности европейских экономик. Европейский Совет 21 марта 2014 подтвердил действенность энергоэффективности по снижению затрат на энергию и уровня энергетической зависимости. Этому предшествовала последовательная политика ЕС по установлению стандартов энергоэффективности, в частности, были приняты основные «энергетические» директивы: 2006/32/ЕС об эффективности конечного использования энергии; 2012/27/ЕС об энергетической эффективности; 2004/8/ЕС о поощрении когенерации; 2009/28/ЕС о стимулировании использования энергии из возобновляемых источников; 2010/31/ЕС об энергетической эффективности зданий; 2003/87/ЕС, о торговле квотами на выброс парниковых газов; 2009/72/ЕС об общих правилах для внутреннего рынка электричества; 2009/73/ЕС об общих правилах для внутреннего рынка природного газа; 2009/31/ЕС о геологическом хранении углекислого газа; 2010/75/ЕС о промышленных выбросах; 2009/125/ЕС о введении правового регулирования для установления требований экодизайна к энергопотребляемой продукции; 2008/1/ЕС о комплексном предупреждении загрязнения и контроле над ним и некоторые другие: 2004/18/ЕС, 2009/125/ЕС, 2011/65/ЕС, 2012/19/ЕС а также стандарты современного энергетического менеджмента ISO 500XX.

Развитие тренда энергоэффективности в энергетической политике Украины.

В последнее время в Украине в законодательном поле и в политике исполнительной власти существенно интенсифицировалась деятельность по пропаганде энергоэффективности и реальным путем ее реализации в сфере энергетики. К знаковым мероприятиям в этом направлении относятся:

1. Разработка проекта новой энергетической стратегии Украины до 2035 года и его обсуждение в обществе. Следует заметить, что по сравнению со стратегиями 2006 и 2013 гг. в последнем проекте отдельными существенными блоками представлены: теплообеспечение населения и промышленности, возобновляемая энергетика и энергоэффективность, включая подраздел повышения энергоэффективности зданий. Причем в материалах стратегии до 2035 года, в которых рассматриваются конкретные сектора энергетики, на первое место ставится энергоэффективность, далее следуют электроэнергетика, теплоэнергетика, добыча газа, угля, нефти, а затем возобновляемая энергетика. Так расставлены приоритеты влияния на ситуацию в энергетике.

2. Реализация двух национальных планов действий до 2020 года – по возобновляемой энергетике и по энергоэффективности с соответствующими секторальными дорожными картами.

3. Разработка проектов нескольких энергозначимых законов Украины: по энергоэффективности зданий; по

фонду энергоэффективности; по энергоэффективности; по коммерческому учету коммунальных услуг; по жилищно-коммунальным услугам; по тарифу на негазовую теплогенерацию; по созданию конкурентного рынка тепловой энергии; по энерго-сервисным компаниям (по состоянию на 1 апреля 2017 г.).

4. Проекты научно-технической и экспертной среды по прогнозированию на дальнюю перспективу социально-экономического развития Украины, включая подробные исследования совместной динамики экономики и энергетики.

Наибольший потенциал повышения энергоэффективности находится в сфере теплоснабжения жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) страны. Главной целью для коммунальной теплоэнергетики Украины становится выбор стратегически выверенных решений по развитию этой сферы ЖКХ – разработка руководящих документов государственного значения (концепции, стратегии, программы) и формирование на их основе научно-технической политики, создание комплекса нормативно-правовых актов и научно-организационных мероприятий, реализация которых обеспечит энергоэффективное использование энергоресурсов, энергетическую безопасность, устойчивое развитие и эффективное функционирование систем теплообеспечения населенных пунктов Украины.

Выводы

Развитию экономики и в т.ч. энергетики Украины в направлении повышения энергоэффективности и взвешенного использования возобновляемых энергоресурсов нет альтернативы. При этом трудно переоценить роль составляющей энергоэффективности в структуре энергетических балансов – как основного потенциального экологически чистого энергоресурса. Использование энергетического законодательства ЕС и его имплементация в экономику страны, безусловно адаптированного к национальным особенностям, в частности, необходимости установления компромисса между финансово-промышленными группами (занимающимися генерацией энергии), а также между ними и конечным потребителем энергии, дает шанс уменьшить удельную энергоёмкость ВВП, повысить энергетическую независимость и усилить национальную безопасность, так необходимую Украине сегодня и в ближайшее время.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Постанова Верховної Ради України «Про Національну енергетичну програму України до 2010 року»*, 15 травня 1996 року, №191/96-ВР.

2. *Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року*. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.03.2006, № 145-р.

3. *Оновлена Енергетична стратегія України на період до 2030 року*. Розпорядження КМ України від 27 04 2013, №1070-р. “Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року”.

4. http://www.kmu.gov.ua/control/publish/article?art_id=249634799.

5. *Башимаков И.* Повышение энергоэффективности

- главный энергетический ресурс (презентация). <https://www/cenef.ru/file/Stady.ppt>.

6. Закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. №261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации".

7. Закон України «Про енергозбереження». Постанова ВР №75/94-ВР від 01.07.1994.

8. Баишмаков И. Месть проигнорированного приоритета «Энергетической стратегии России». // <https://www/cenef.ru/file/Wpaper101.pdf>.

9. Порфирьев Б.Н., Рогинко С.А. Энергетика на возобновляемых источниках: Перспективы в мире и России. // Вестник РАН, т. 86, №11. – 2016. – С. 963-971.

10. Директива ЕС 2012/27/ЕС от 25 октября 2012 г. об энергетической эффективности.

11. Баишмаков И. Закон повышающей энергоэффективности. Энергоинформ, №27 (158), 2002.

12. Сам собі пан. Вісник української мережі "Енергоефективні міста", №3-4, 2005. с.17.

13. Карп И.Н., Сухин Е.И. Количественная оценка влияния энергосберегающих технологий на экономию природного газа в промышленности и энергетике // Эко-технологии и энергосбережение. 2007. – №4. С. 24-44.

14. Національна доповідь про стан та перспективи реалізації державної політики енергоефективності у 2008 році. НАЕР, Київ. 2009. – 95 с.

15. Закиров Д.Г. Значение национального проекта в повышении энергоэффективности и экономики регионов страны // Энергосбережение. 2008. – №8. – С. 56-62.

16. Стратегія сталого розвитку "Україна - 2020". Указ Президента України від 12 січня 2015 року, №5/2015.

17. «Форсайт 2016» – сценарій соціально-економічного розвитку України до 2020 і 2030 років: анотація / керівник проекту М. З. Згуровський // – Київ: НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Видавництво "Політехніка", 2016. – 20 с.

18. Программа "Интеллектуальная энергия Европы". Решение 1639/2006/ЕС Европейского парламента и Совета ЕС от 24 октября 2006 г.

19. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 405 с.

20. Денисюк С.П. Світові тенденції модернізації енергетичної інфраструктури. Пріоритети для України. Презентація. Конф. «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'16. <http://pems.kpi.ua/>.

INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF UKRAINE'S ECONOMY – MISSION AND THE MAIN PRIORITY OF DEVELOPMENT OF NATIVE ENERGY

Basok B.I., Bazeev T.T.

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

Possible trends in the development of Ukrainian energy for improving the energy efficiency of Ukraine's economy were considered. The role of improving energy efficiency in the structure of energy balances is emphasized as the main potential ecologically clean energy resource. The necessity of implementing the EC energy legislation, adapted to national peculiarities, was stressed in the economy of the country.

References 20, figures 5.

Key words: energy efficiency, energy saving, heat supply, economy, energy strategy, energy intensity, energy policy, innovative equipment, EU energetic directives.

LITERATURE

1. *The Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine* "About the national energy program of Ukraine until 2010", May 15 in 1996, №191 / 96-VR.
2. *The approval of the Energy Strategy of Ukraine till 2030*. Cabinet of Ministers of Ukraine dated 15.03.2006, № 145-p.
3. *The updated Energy Strategy of Ukraine till 2030*. Resolution of the Cabinet of Ukraine from April 27, 2013, №1070-p. "On approval of the Energy Strategy of Ukraine till 2030".
4. http://www.kmu.gov.ua/control/publish/article?art_id=249634799.
5. *Bashmakov I.* Increase energy efficiency – Chief power machinery resource (presentation of). <https://www/cenef.ru/file/Stady.ppt>.
6. *Law of the Russian Federation* No. 261-FZ of November 23, 2009 "On Energy Saving and on Increasing Energy Efficiency and on Amending Certain Legislative

Acts of the Russian Federation."

7. *Law of Ukraine* "On energy saving". VR Decision №75 / 94-VR of 01.07.1994.
8. *Bashmakov I.* Revenge of the ignored priority of the "Energy Strategy of Russia". // <https://www/cenef.ru/file/Bpaper101.pdf>.
9. *Porfiryev B.N., Roginko S.A.* Energy on renewable sources: Prospects in the world and Russia. // *Vestnik RAN*, v. 86, No. 11. – 2016. – P. 963-971.
10. *EC Directive* 2012/27 / EC of 25 October 2012 on energy efficiency.
11. *Bashmakov I.* The law of increasing energy efficiency. *Energoinform*, No. 27 (158), 2002.
12. *Mr Himself.* Bulletin of the Ukrainian network "Energy Efficient Cities", №3-4, 2005. p. 17.
13. *Karp I.N., Suhin E.I.* Quantitative assessment of the impact of energy saving technologies on the economy of natural gas in industry and energy. *Ecotechnologies and energy saving*. 2007. № 4. PP. 24-44.
14. *Zakirov D.G.* The Importance of the National Project in Enhancing the Energy Efficiency and the Economy of the Regions of the Country. *Energy Saving*. 2008. №8. P. 56-62.
15. *National Report* on the prospects for the implementation of state energy efficiency policy in 2008. NAER Kyiv. 2009. – 95 p.
16. *Strategy for Sustainable Development* "Ukraine - 2020". Decree of the President of Ukraine on January 12, 2015, №5 / 2015
17. "Foresight 2016" – scenario of socio-economic development of Ukraine for 2020 and 2030: Abstract / Project Manager MZZgurovsky. Kyiv: "KPI named Igor Sikorsky." Publishing house "Polytechnic", 2016. 20 p.
18. *Program* "Intellectual Energy of Europe". Decision 1639/2006 / EC of the European Parliament and of the Council of 24 October 2006
19. *Intelligent electricity networks: elements and modes: The Society*. Ed. Acad. NAS of Ukraine OV Kirilenko. Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. K. Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, 2016. 405 p.
20. *Denisyuk S.P.* Global trends of modernization of energy infrastructure. Priorities for Ukraine.

Получено 29.03.2017
Реceived 29.03.2017

ПУТИ СОКРАЩЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В КОММУНАЛЬНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Сигал А.И., канд. техн. наук

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

Проанализирован стан обладнання комунальної теплоенергетики України. Розглянуті можливості зниження використання природного газу і шляхи заміни газу іншими видами палива.

Проанализировано состояние оборудования коммунальной теплоэнергетики Украины. Рассмотрены возможности снижения потребления природного газа и пути замещения газа иными видами топлива.

Condition of equipment of municipal heat energy sector of Ukraine was analyzed. Capabilities of reduction of natural gas consumption and ways of gas replacement of another types of fuel were considered.

Рис. 7.

Ключевые слова: коммунальная теплоэнергетика, природный газ, котлы, горелки.

Инфляция гривны с 8 до 24 за 1 доллар США привела к адекватному росту цен, в первую очередь на энергоносители. Выросли цены также на электроэнергию и, соответственно, на воду, т.к. в ее цене значительная составляющая электроэнергии. Тариф на электроэнергию вырос в 3,2 раза.

С повышением цены газа для теплокоммунального (ТКЭ), доля газа в цене для конечного потребителя подросла с 70 до 85 % и колеблется в пределах 83...85 % в утверждаемых НКРКП тарифах.

Несложные расчеты показывают, что если задаться ценой газа в 220 долл. США за 1000 м³ или за 8 Гкал, то получим 690 грн./Гкал. Тогда ТКЭ получает 15 % этой суммы или 105 грн. Итого, суммарная цена 690 + 105 – это около 800 грн./Гкал. Именно она и должна быть реперной при установлении тарифа.

Если учесть, что в оставшихся у предприятия ТКЭ 100 грн./Гкал около 60 % занимает оплата воды и электроэнергии, а остальные 40 % содержат НДС, налоги и зарплату, то на ремонты, реконструкцию и новое оборудование остается 1...3 %. Однако нет ни одной теплоснабжающей компании в мире, где сбор платежей населения составлял бы 100%.

Именно эти 1...3 %, как не защищенные статьи и исчезают в разделе недоплаты потребителя. Реально, нам для получения ощутимой экономии газа около 30 %, необходимо инвестировать около 1,5 трлн. грн., сумму для бюджета практически неподъемную.

Источником этих инвестиций может быть только само население. Рассматривая три пути финансирования: привлечение кредитов, привлечение инвестиций, муниципальное или государственное финансирование, легко видеть, что все они для конечного потребителя не сильно отличаются, т.к. рассчитывают именно на наши с Вами возможности оплаты. До последнего времени все области делали и защищали как Региональные программы модернизации коммунальной теплоэнергетики, где несомненным лидером разработки был Институт технической теплофизики, так и Схемы теплоснабжения городов. В последнее время сроки действия этих документов неконтролируемо увеличиваются, новые готовятся

не регулярно и не качественно. По сути, единственным документом «развития», на подготовку которого предприятия ТКЭ еще тратят силы и средства, являются инвестиционные программы.

Некоторые резервы у нас, впрочем, есть. Так, на балансе предприятий ТКЭ находится около 70 тыс. котлов, эксплуатируется же около 46 тыс., из которых около 20 тыс. к дальнейшей эксплуатации без ремонта не пригодны. Следует оценить, какое количество котлов из оставшихся 24 тыс. реально пригодны к эксплуатации и могут «подхватить» нагрузку вместо вышедших из строя.

Хочется отметить, что Украина входит в число стран-лидеров централизованного теплоснабжения не только Европы, но и Мира, а Киев эксплуатирует третью по величине в Мире централизованную теплосеть.

Построенные предыдущими поколениями наших соотечественников, системы централизованного теплоснабжения немного недотянули до времени промышленного использования новых видов энергии, таких, как солнце, ветер, электроэнергия, твердые бытовые отходы, биогаз, биомасса

Следует также иметь в виду, что вся альтернативная энергетика работает в базе и, соответственно, вытесняет атомную энергетику, а Украине остро нужны пиковые маневровые мощности.

Ориентировочно, удельный расход условного топлива на 1 Гкал. вырабатываемую на источнике теплоты, составляет около 160 кг у.т./Г, а в неконденсационных котельных ЕС – около 150 кг.у.т./Г. Разность, т.е. около 10 кг у.т., и есть реальный потенциал энергосбережения в источнике. Для уточнения этих цифр целесообразно сформировать условия объединенного эколого-энергетического аудита, который и провести на основных источниках теплоснабжения в преддверии введения в действие Директивы 2010/75/ЕС снижающей допустимые нормативы на выбросы в атмосферу в разы (рис. 1).

С точки зрения замещения природного газа иными видами топлива, в централизованном теплоснабжении, можно провести грубую оценку, показывающую, что сжигание биомассы может обеспечить до 6...8 %

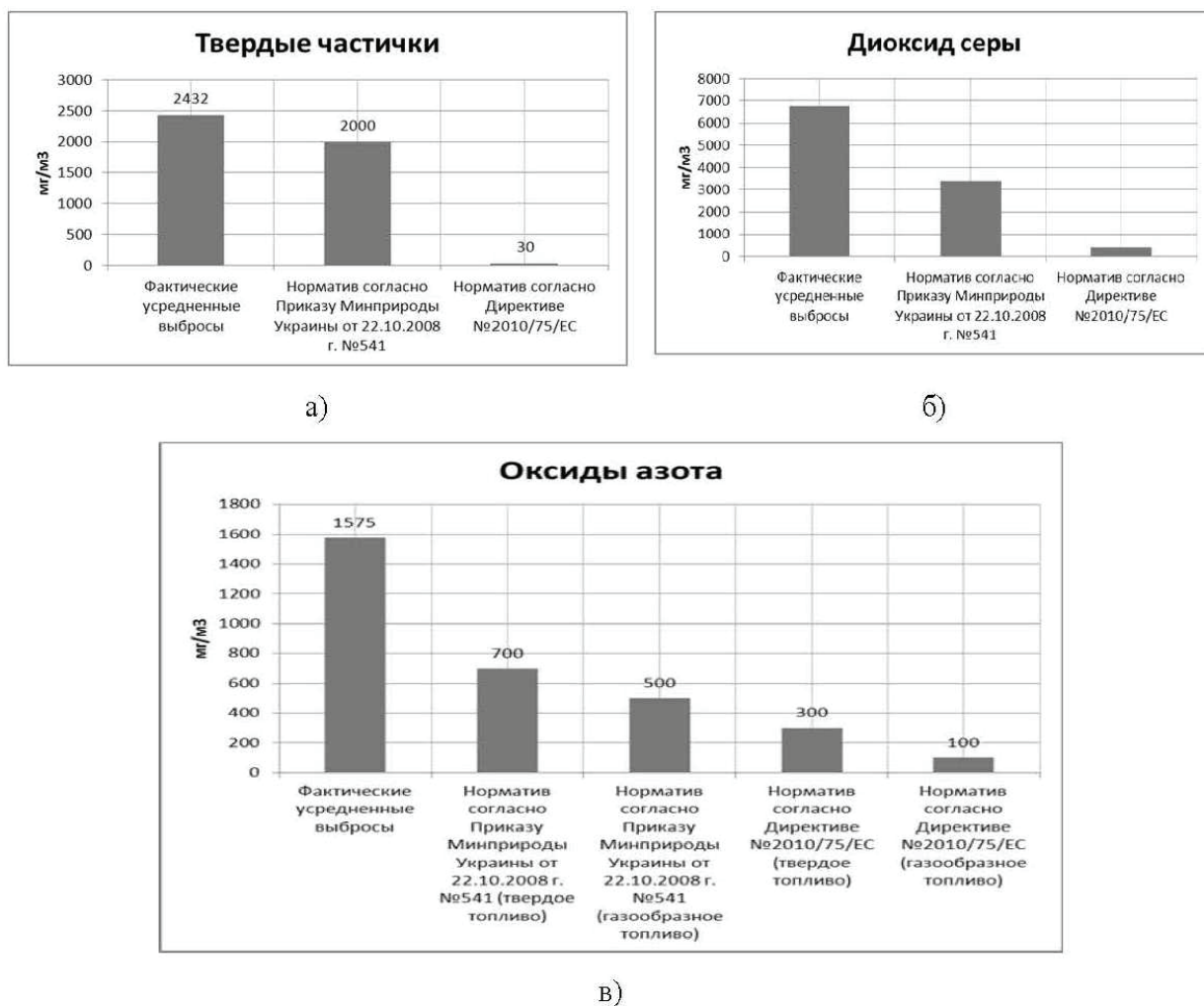


Рис. 1. Фактические и нормативные выбросы для котлов Украины мощностью выше 50 МВт: а) твердых частиц; б) диоксида серы; в) оксидов азота.

потребностей и ограничено реальным ресурсом и экономической целесообразностью; сжигание твердых бытовых отходов (ТБО) – до 9 % и ограничено как отсутствием финансового ресурса в виде «длинных», на 6...8 лет, денег, так и снизившейся теплотворной способностью ТБО в связи с падением уровня жизни населения, обусловленную инфляцией гривны.

Наибольший же потенциал замещения имеет электроэнергия. Она составляет 14 %, если использовать электроэнергию напрямую, и 29 % – если около 30 % электроэнергии пустить на тепловые насосы с COP 2,5...3,5 (рис. 2, а).

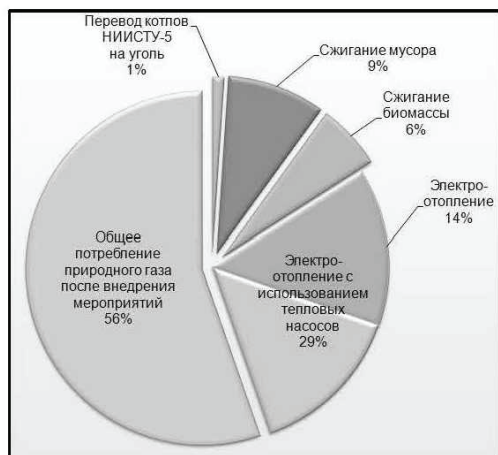
Предлагаемые электрические системы теплоснабжения могут быть концептуально централизованными, умеренно децентрализованными, и индивидуальными. Централизованные системы предполагают установку электроподогревателей обратной сетевой воды (электродотлов) в объеме, лимитируемом мощностью резервного электрического ввода котельных. Использование профицита электрической энергии в ночной период путем объединения традиционного централизованного

теплоснабжения на природном газе в дневной период с электрообогревом в ночной, обеспечивает замещение до 1,5 млрд. м³ газа и составляет основу перехода к так называемому гибриднему теплоснабжению.

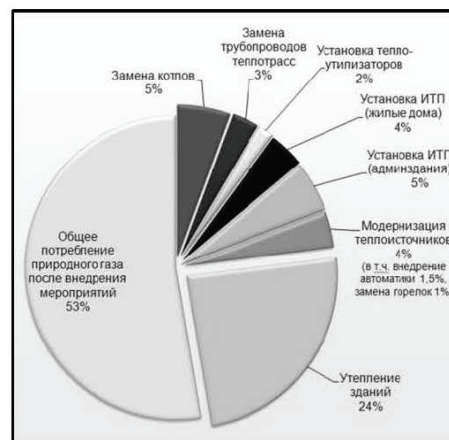
Умеренно-децентрализованное теплоснабжение на основе электроэнергии предполагает установку баков-аккумуляторов в домах с электроплитами, что позволит использовать существующие сети, обеспечить отопление зданий на базе собственных индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) в осенне-весенний период и частично уменьшить теплотребление зданий зимой.

Что до индивидуального электроотопления, то это использование электроподогрева пола совместно с кондиционером (тепловым насосом), работающим на отопление с COP больше 3.0.

Потенциально именно электроотопление придет на смену нынешним технологиям. Так в марте 2017 г. компания Tesla предложила строительство аккумулирующих электромошностей взамен ГАЗС по цене 250 \$ за 1 кВт установленной мощности 100 мВт электромошности под ключ за 100 дней.



а) замещение



б) экономия

Рис. 2. Потенциал замещения и экономии природного газа.

Единственной преградой к переходу на массовое использование электроэнергии для отопления является изношенность базовой генерации (АЭС) и отсутствие стратегии ее поддержания или замещения, а также механизма финансирования таких работ. К сожалению и новая энергетическая стратегия до 2035 г. не прояснила, а еще более усложнила понимание этого вопроса.

Возможности экономии природного газа непосредственно в источнике теплоснабжения весьма ограничены. Это 1,0...1,5 % за счет замены горелочных устройств, а также до 1,5...2 % за счет новой горелочной автоматики, снижающей перетопы в переходной период. Всего, за счет повышения КПД котлов – от 2 до 8 %. Усредненно примем 4 %. (рис 2, б).

На выходе из котельной можно дополнительно охладить дымовые газы в утилизаторе теплоты, что обеспечит 3...4 % на котлах некондиционного типа и 8...9 % при установке значительно более дорогих утилизаторов конденсационного типа из нержавеющей стали и реновации дымовых труб.

Потери в теплотрассах составляют от 2...5 % в новых предварительно изолированных сетях, нормативных 13 % и более до 16 % в распределительных и протяженных сетях Харькова и около 18 % в сетях г. Киева. Введение «лимита» максимальных допустимых потерь 13 % приводит к недоиспользованию энергетического потенциала. Например, если имеется резерв мощности на котельной, но потери на транспортировку более 13 % (что часто бывает в больших и старых теплосетях), строится новая котельная, что часто дешевле перекладки сетей с использованием качественных предизолированных труб.

Когда же теплоноситель достигает потребителя, мы сталкиваемся не только с общедомовой системой, которая, чаще всего, не позволяет учитывать и регулировать потребление индивидуально каждым владельцем жилья, но и оснащена, как правило, элеваторным узлом ввода для эффективной работы которого требуется высокое давление на входе. Такое давление обычно отсутствует по техническим причинам. Сети давно изношены и их

предпочитают без нужды не нагружать. Уже несколько лет, как отменены температурные испытания сетей, а сегодня обсуждается и вопрос отмены гидравлических испытаний. Что до мнения автора по данному вопросу, то в гидравлических испытаниях давлением 1,25 от расчетного в нынешнем формате, без отсеечения иных потребителей и закольцовки участка сети, большого смысла в таких испытаниях не просматривается.

Замена элеваторных узлов на индивидуальные теплопункты (ИТП) даст существенные возможности для экономии топлива.

Во-первых, из-за того, что элеваторный узел (фактически представляющий собой водяной эжектор) очень чувствителен к изменению давления на входе. Так как в последние годы регулировка практически всех систем теплоснабжения претерпела значительные изменения (уменьшились расходы в связи с отключением ряда потребителей, упало давление в системе, упало оно и из-за установки ИТП на части зданий), элеваторные узлы практически не работают, создавая лишь дополнительное сопротивление и разбалансируя систему.

Во-вторых, из-за возможности регулирования температур в зданиях, в которых можно не поддерживать комфортную температуру в течение всего времени суток. Это, например, учреждения, кроме больниц. На таких объектах установка ИТП обеспечивает экономию в 20...25 %, в то время, как на жилье лишь 3...5 %.

Несмотря на такой значительный эффект в админзданиях в целом по стране эффект не превышает 5 % из-за небольшого числа таких зданий, относительно жилого фонда.

Что до потенциала энергосбережения за счет утепления зданий, то формально он достаточно велик и составляет до 24 %, и именно на использование этого потенциала направлены усилия правительства и гражданского общества в последние годы, однако следует учитывать, что это один из наиболее дорогих в финансовом отношении потенциалов, доступ к которому ориентировочно оценивается в 500 млрд. грн.

Последнее время именно этому направлению эко-

номии посвящено множество работ. Хочется их дополнить следующими соображениями:

- внешнее утепление может при неверном расчете приводить к конденсации в толще самой стены;

- крепление теплоизоляционных мат шурупами или дюбелями создает мостики холода, количество которых от 8 и более на 1 м² при заглублении от 30 мм полностью нивелирует установку теплоизоляции в стене стандартной бетонки;

- латочное утепление (поквартирное) должно быть запрещено не только с точки зрения сохранения фасада здания, но и с точки зрения невозможности регулирования теплоснабжения по стоякам (в утепленных квартирах жарко и они просят уменьшить параметры теплоносителя для экономии, а в квартирах выше и ниже при этом холодно). Не ясно также, что делать со множеством уже утепленных таким методом квартир.

С тем, что утеплять старый фонд «бетонки» и «хрущевки» необходимо, все согласны, однако дело это не очень скорое и весьма не дешевое.

Так, вложение, обеспечивающее экономию 1 тыс. м³ природного газа составит около 200 тыс. грн., что при цене 200 долл. США за 1 тыс. м³ обеспечит возврат инвестиций за 40 лет, но это один из самых пессимистических прогнозов.

Если выстроить рассматриваемые нами методы энергосбережения по срокам окупаемости, с учетом новых цен на тепловую энергию, то безусловным лиде-

ром с окупаемостью до 1 года является сжигание биомассы, на втором месте – модернизация котельных с окупаемостью до 1,5 лет. С небольшим отставанием и окупаемостью до 2 лет свое место занимает электроотопление. Установка теплоутилизаторов неконденсационного типа окупается за 1,5, а конденсационного – за 2,5 года. Замена котлов мощностью до 3,15 МВт окупится за 3 года, а установка индивидуальных тепловых пунктов на административных зданиях – за 3,5 года. Наименее быстроокупаемым мероприятием являются электроотопление с использованием теплонасосных технологий – 6 лет, и сжигание мусора – 8...9 лет.

Если все рассматриваемые мероприятия построить по ранжиру вложений, необходимых для экономии 1 тыс. м³ природного газа (рис. 4), то получим такую картину: с вложениями до 1 тыс. грн. лидирует модернизация котельных с заменой горелок и автоматики, до 2 тыс. грн. – сжигание биомассы; установка теплоутилизаторов потребует до 4 тыс. грн.; электроотопление – около 6 тыс. грн.; замена котлов – более 8 тыс. грн.; установка ИТП на админздания – 30 тыс. грн. и использование тепловых насосов – 35 тыс. грн. В следующей ценовой категории более 50 тыс. грн. за 1 тыс. м³ сэкономленного газа видим ТЭЦ на мусоре с ценой 55 тыс. грн.; утепление зданий с ценой 60...65 тыс. грн.; установка ИТП на жилые дома – до 120 тыс. грн. и замена теплотрасс на предварительно изолированные – более 200 тыс. грн.

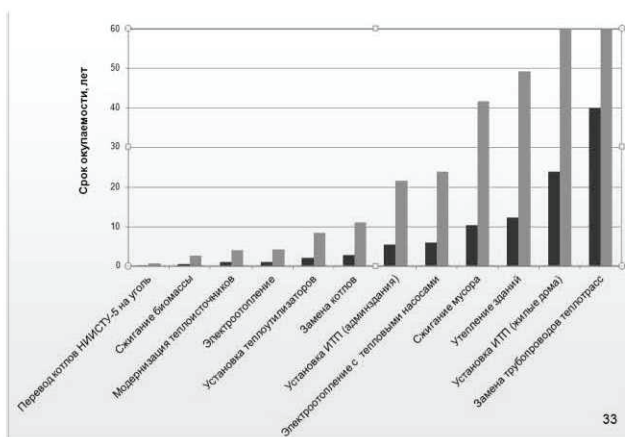


Рис. 3. Срок окупаемости вложений.

Говоря о теплоснабжении населения, мы в последнее время ставим во главу угла экономику, в том числе в обсуждении вопросов сохранения систем теплоснабжения как таковых. Думается, что это не очень верный подход. Если вернуться к основополагающим учебникам теплоснабжения, то цитируем, что задачей централизованного теплоснабжения (ЦТ) является: «обеспечение надежного и бесперебойного отопления населения». Вот на этой надежности и бесперебойности хочется остановиться подробнее.

Из рис. 5 видно, что количество котлов более 100 Гкал/час в Украине не превышает 1 % от численно-

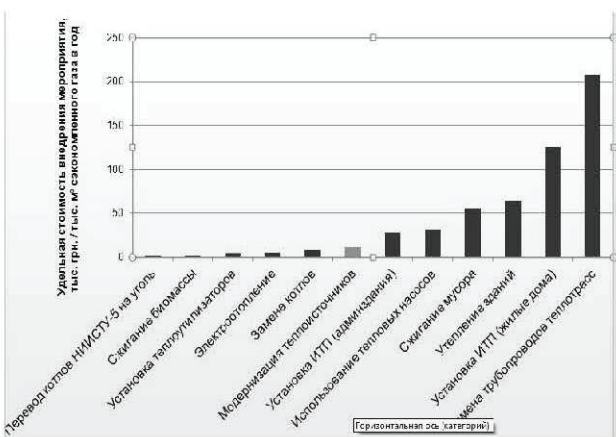


Рис. 4. Удельная стоимость внедрения мероприятий.

сти, в тоже время они производят до 50 % всей тепловой энергии ЦТ. Еще около 20 % производят котлы от 20 до 100 Гкал/час. Итого, 3 % котлов производят до 70 % тепловой энергии. Очевидно, что именно выход этих котлов из строя и приведет к необратимой утрате ЦТ в Украине и этого нельзя допустить. Что же угрожает этой группе котлов в первую очередь? Это – потеря потребителя и недогрузка. Последнее снижает КПД и ставит под сомнение саму целесообразность эксплуатации таких котлов.

На второе место следует поставить устаревшие системы регулирования и автоматики, что приводит к

пережогу топлива в переходные периоды. На третье – достаточно высокую температуру уходящих газов и отсутствие теплоутилизации, и на последнем (относительно не по значимости) – проблему конденсации дымовых газов в кирпичных трубах при низких нагрузках.

Можно подробно рассказывать о технических решениях, разработанных в нашем Институте для минимизации вышеизложенных проблем, однако это тема иной статьи. Хочется отметить, что мы имеем как новые, так и модернизированные на базе установленных типовых, горелочные устройства; системы управления и безопасности, в том числе с использованием датчиков кислорода и γ -зонда; утилизаторы теплоты конденсационного,

не конденсационного и комбинированного типов; средства защиты дымовой трубы и многое другое.

Так, для котлов серии ПТВМ вертикальной компоновки (ПТВМ-50, ПТВМ-100) мощностью, соответственно, 58 и 116 МВт, интерес представляет техническое решение Института газа НАН Украины, предлагающее установку горелочных устройств стадийного сжигания и дополнительной щелевой горелки в холодной воронке, что улучшит работу котла на низких нагрузках и наряду со снижением образования оксидов азота на 20...25 % обеспечит экономию газа 5 и 10 млн. м³/год для котлов 50 и 100 Гкал соответственно.

Таблица 1. Пути модернизация основных котлов коммунального хозяйства

№	Тип котлов	Мощность, МВт	Мероприятие	Кап. затраты, тыс. грн.	Повышение КПД, %	Эколог. эффект.	Годовая экономия газа млн. м ³	Другие преимущества	Окупаемость, год
1.	ТВГ-8, ТВГ-8М, КВГ-7,56, ТВГ-4р	4-10	Замена горелок на подовые 3-й модели	150	1,4-2,1	Сниж. NOx на 20%	0,66	Улучшение регулируемости Продление ресурса горелок	1
			Замена конвективной поверхности нагрева на новую из труб $\varnothing 32 \times 3$	320	3,5	-	1,33	Продление ресурса котла	1,1
			Комплексная модернизация с заменой горелок и конвективной поверхности нагрева	470	5,0	Сниж. NOx на 20%	1,99	Продление ресурса котла на 15 лет	1
2.	ДЕ-10, ДЕ-16, ДЕ-25	7-20	Переоборудование горелки в двухколлекторную с режимом малого газа	100-120	2-3 (до 6 в осенне-весенний период)	Сниж. NOx на 30%	0,8 (3,8)	Улучшение регулируемости Малые нагрузки	0,8
3.	ПТВМ-50 ПТВМ-100	58 116	Перевод вихревых горелок на горелки ступенчатого горения	900		Сниж. NOx на 45%	-	Улучшение регулируемости	-
			Модернизация котла с установкой дополнительной горелки в холодной воронке	500-700	2-3	Сниж. NOx на 20%	5-10	Улучшение регулируемости Малые нагрузки	1

Для котлов меньшей мощности ДЕ и ДКВР от 6 до 25 Гкал или до 20 МВт мы, также совместно с Институтом газа НАН Украины, предлагаем переоборудовать установленные вихревые газомазутные горелки в чисто газовые двухколлекторные, с переоборудованием мазутной форсунки в встроенную горелку малого газа. Параллельно с лучшим регулированием и возможностью работы на сниженных нагрузках обеспечивается снижение образования оксидов азота на 30 % и годовая экономия газа в 800 тыс. м³, что гарантирует окупаемость проведенных работ до 1 года.

Всего в системе ЦТ необходимо заменить 6200 горелок, что даст 180 млн. м³ экономии газа.

Для котлов типа ТВГ и КВГ, которых много в эксплуатации, можно по замене горелок на новые подовые с современной автоматикой и замену конвективных

пакетов на сваренные из труб 32 x 3, что обеспечивает продление ресурса котла на 15 лет с окупаемостью до 1 года.

Обзор ситуации с котлами был бы не полным, если бы обошли вниманием котлы НИИСТУ-5, число которых уменьшают уже более 25 лет. На сегодня их осталось в эксплуатации только в коммунальной теплоэнергетике 4490 единиц, из которых около 2350 отработало свой ресурс и нуждается в срочной замене или реконструкции (рис. 6).

Несложная и недорогая модернизация, предложенная нашим Институтом (рис. 7), как и иные виды модернизации этих котлов внедрены на 313 котлах, что составляет около 7 % парка котлов. Причем безусловными лидерами такой модернизации выступает Николаевская (72 котла), Черкасская (80 котлов) области.

При модернизации котлов может быть сэкономлено природного газа 162 млн. м³/год. Рациональным подходом в замене котлов до 3,15 МВт можно считать такой. Разделить аналогичные котлы на 3 группы:

Первая – котлы, которые последние 3 года не эксплуатировались и находятся в резерве. Эти котлы замене не подлежат.

Вторая – котлы, эксплуатируемые при падении температуры окружающей среды ниже – 15 °С. Эти котлы нуждаются в недорогой модернизации.

Третья – котлы, работающие в базе. Такие котлы

нуждаются в замене. Ориентировочная стоимость замены котла НИИСТУ-5 на новый современный котел аналогичной мощности, разработанный в Институте под руководством автора, не менее 400 тыс. грн.

Оценивая ориентировочную потребность в оборудовании ЦТ можно отметить не менее 2000 шт. котлов до 1 МВт, около 200 капитальных ремонтов котлов 50...180 МВт, более 4000 теплоутилизаторов, около 1100 ИТП, 1750 котлов на биомассе (более 1 МВт), более 7,5 тыс. км теплотрасс, 750 блочных котельных и более 3000 теплонасосных установок.



Рис. 5. Доля котельных разной мощности в Украине и их вклад в производство тепловой энергии.

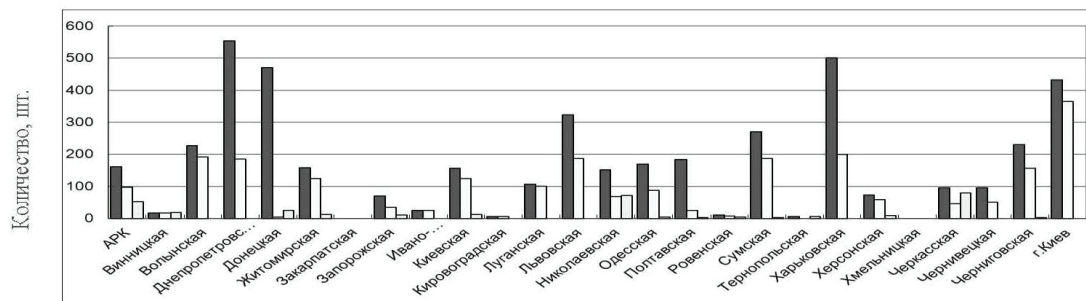


Рис. 6. Результаты мониторинга технического состояния котлов НИИСТУ-5 теплоснабжающих предприятий Украины.

Количество котлов – 4493 шт., работают более 20 лет – 2348 шт.

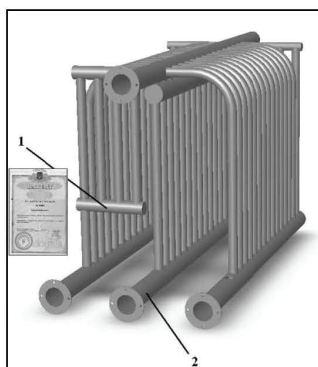


Рис. 7. Модернизация трубной части котла НИИСТУ-5.

Выводы

Автор считает целесообразным :

1. Вернуть большие (50...180 МВт) котлы не баланс Государства. Местные власти не имеют ресурсов для их содержания и ремонта, а это 50 % ЦТ.

2. Установить на этих котлах конденсационные теплоутилизаторы, горелки малого газа и датчики кислорода в уходящих газах. Это может дать около 400 млн. м³ экономии газа.

3. Не проводить тендеры на закупку каждого котла, а провести тендер единовременно за заводы по производству разных типов котлов и в дальнейшем производителя не менять. Это позволит загрузить заводы и

обеспечить украинское производство оборудования.

4. Закрепить за Минрегионбудом законодательно техническую политику централизованного теплоснабжения, за которую ведомство должно отчитываться ежегодно.

5. Закрепить коммунальное имущество за мэром города. Приходя после избрания он должен принимать у предшественника, а уходя, сдавать последователям протяженность тепловых и иных сетей, число котельных, котлов и т.д.

6. Вернуть централизованное финансирование отраслевой науки в Министерства.

7. Сменить экономическую политику энергорынка для стимулирования резкого увеличения ночного потребления электроэнергии. Это даст стимул достройки атомных энергоблоков, продаже электроэнергии за рубеж, развитию альтернативной энергетики.

8. Использовать международные гарантии и кредитные программы для привлечения инвестиций в строительство ТЭЦ на твердых бытовых отходах. Для этого необходимы крупные (от 300 млн. долл. США) инвестиции не менее, чем на 9...10 лет.

9. Украина имеет серьезные проблемы с торфяни-

ками, которые склонны к самовозгоранию и, соответственно, загрязнению воздуха. Возить насыпной торф экономически нецелесообразно, а брикетировать дорого. Использование торфа может стать для Украины существенным ресурсом. Однако путь лежит в строительстве небольших, возможно, передвижных, электростанций непосредственно на торфяниках с передачей электроэнергии в сеть и использованием сбросной теплоты для сушки новых порций торфа.

10. Методы энергосбережения, а также методы замещения природного газа могут в пределе дать эффект снижения его потребления до 2 млрд. м³/год по каждой группе методов.

Стоимость внедрения первой группы методов (энергосбережение) приближается к 60 млрд. грн., причем наиболее затратными (30 млрд. грн.) являются самые необходимые – мероприятия по замене теплотрасс, без выполнения которых иные и не имеют смысла.

Из мероприятий по использованию альтернативных видов энергии стоимостью около 30 млрд. грн. наиболее затратной является программа использования электроэнергии стоимостью более 8 млрд. грн., однако именно ее следует рассмотреть в первую очередь.

WAYS OF REDUCTION OF NATURAL GAS CONSUMPTION IN MUNICIPAL HEAT ENERGY SECTOR

Sigal O.I.

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

Condition of equipment of municipal heat energy sector of Ukraine was analyzed. Capabilities of reduction of natural gas consumption and ways of gas replacement of another types of fuel were considered.

Key words: municipal heat energy sector, natural gas, boilers, burners.

*Получено 14.03.2017
Received 14.03.2017*

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ БІОЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

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

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

Проаналізовано місце біомаси в енергетичному балансі України та роль біоенергетики у досягненні цілей Національного плану дій з відновлюваної енергетики. Представлено результати оцінки енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Розглянуто проблеми встановлення тарифів на теплову енергію та основні проблеми ринку паливної біомаси. Запропоновано шляхи створення конкурентних ринків теплової енергії та біопалива в Україні.

Проанализированы место биомассы в энергетическом балансе Украины и роль биоэнергетики в достижении целей Национального плана действий по возобновляемой энергетике. Представлены результаты оценки энергетического потенциала биомассы в Украине. Рассмотрены проблемы установления тарифов на тепловую энергию и основные проблемы рынка топливной биомассы. Предложены пути создания конкурентных рынков тепловой энергии и биотоплива в Украине.

The paper presents analysis of the place of biomass in Ukraine's energy balance and the role of bioenergy in achieving the goals of the National Renewable Energy Action Plan. The potential of biomass for energy in Ukraine is analyzed. Problems of heat tariffs setting and main problems of biofuel market are considered. Ways for creating the competitive heat and biofuel markets in Ukraine are suggested.

Бібл. 5, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: біоенергетика, біомаса, біопаливо, потенціал біомаси, альтернативні джерела енергії, ринок теплової енергії, ринок біопалива.

АДЕ – альтернативні джерела енергії;
НКРЕКП – Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг;
НПДВЕ – Національний план дій з відновлюваної енергетики;

ТЕ – тепла енергія;
ЦТ – централізоване теплопостачання;
н.е. – нафтовий еквівалент;
с/г – сільське господарство;
у.п. – умовне паливо.

Місце біомаси в енергетичному балансі України

У грудні 2016 року Державна служба статистики України оприлюднила енергетичний баланс країни за 2015 р. [1]. Аналіз основних показників енергобалансу 2015 року та кількох попередніх років стосовно біопалив, перерахований у заміщення природного газу, представлено на рис. 1.

По показнику «Виробництво біопалива та відходів» у 2015 р. заміщення газу біопаливом склало 3,26 млрд. м³/рік, а середній темп зростання з 2010 р. до 2015 р. становив 38 %/рік. По показнику «Загальне постачання первинної енергії з біопалива та відходів» у 2015 р. заміщення газу біопаливом склало 2,63 млрд. м³/рік, а середній темп зростання у період 2010-2015 рр. становив 26 %/рік.

Різницю між «виробництвом» та «постачанням» складає експорт біопалив за межі України у вигляді гранул (пелет), тріски, дров та інших видів біопалив. Ці ресурси, що експортуються, легко можуть бути залучені до використання на внутрішньому ринку України при створенні сприятливих умов для цього.

Роль біоенергетики в енергобалансі 2015 р. відзначена як ключова (цитата): «У структурі виробництва відновлюваних джерел енергії у 2015 р. найбільшу питому вагу мало біопаливо – 81,3 %». У 2015 р. внесок енергії з біопалива складав 2,5 % (1283 тис. т н.е.) кінцевого споживання енергії та 2,3 % (2102 тис. т н.е.)

загального постачання первинної енергії в Україні.

Статистичних даних щодо виробництва енергії з біопалива у 2016 році ще немає, але є підстави прогнозувати, що заміщення природного газу біопаливом перевищить 3 млрд. м³/рік. Приблизно половину цієї величини складає заміщення газу в приватних домогосподарствах шляхом спалювання, переважно, дров. Друга половина – це заміщення газу в промисловості за рахунок використання дров, деревної тріски, пелет, лушпиння соняшника. Фактично, це два сектори, де держава не регулює встановлення тарифів на тепло, і інвесторам економічно вигідно заміщувати природний газ, враховуючи його суттєве подорожчання протягом останніх років. Терміни окупності відповідних біоенергетичних проєктів зазвичай складають 2...3 роки.

Енергетичний потенціал біомаси в Україні

Україна має великий потенціал біомаси, доступної для виробництва енергії – близько 29 млн. т у.п. за даними 2015 року. Основними складовими потенціалу є побічна продукція сільського господарства (солома, стебла та ін.) і енергетичні культури (табл. 1).

Енергетичний потенціал біомаси аграрного походження (близько 11 млн. т у.п./рік) в Україні у більш, ніж 5 разів перевищує потенціал таких видів деревної біомаси, як дрова, порубкові рештки та відходи деревообробки (близько 2 млн. т у.п./рік). Проте солома,

стебла та інші побічні продукти сільськогосподарського виробництва суттєво складніші для використання в якості палива, потребують спеціалізованого і більш дорого обладнання, а також досить складного етапу збирання, транспортування і зберігання. Однак, без залучення

агровідходів і залишків в енергетичний баланс Україна не зможе суттєво збільшити обсяги заміщення природного газу. Масове споживання таких біопалив – це найближче майбутнє розвитку біоенергетики в країні.

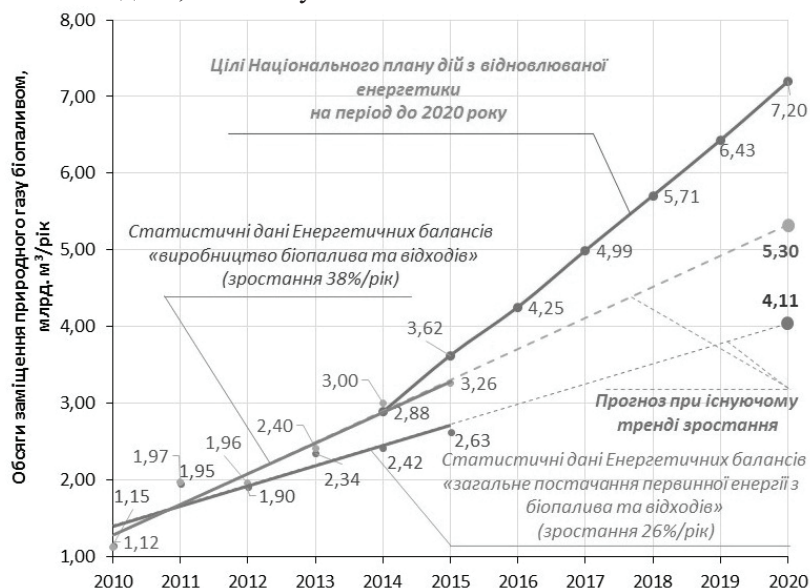


Рис. 1. Динаміка росту сектору біоенергетики в Україні.

Табл. 1. Енергетичний потенціал біомаси в Україні (2015 р.)

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн. т	Частка, доступна для енергетики, %	Економічний потенціал, млн. т у.п.
Солома зернових культур	35,1	30	5,22
Солома ріпаку	3,1	40	0,62
Побічна продукція виробництва кукурудзи на зерно (стебла, стрижні)	30,3	40	3,31
Побічна продукція виробництва соняшника (стебла, корзинки)	21,2	40	1,74
Вторинні відходи с/г (лушпиння, жом)	6,6	47	0,53
Деревна біомаса (дрова, порубкові залишки, відходи деревообробки)	6,0	94	1,98
Деревна біомаса (сухостій, деревина з лісосмуг, обрізки садів та виноградників)	11,0	58	2,57
Біодизель (з ріпаку)	-	-	0,27
Біоетанол (з кукурудзи і цукрового буряку)	-	-	0,77
Біогаз з відходів та побічної продукції агропромислового комплексу	1,6 млрд. м³ CH ₄	50	0,97
Біогаз з полігонів твердих побутових відходів	0,6 млрд. м³ CH ₄	34	0,26
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)	1,0 млрд. м³ CH ₄	23	0,27
Енергетичні культури:			
- верба, тополя, міскантус	11,5	90	6,28
- кукурудза (на біогаз)	3,3 млрд. м³ CH ₄	90	3,68
Торф	-	-	0,40
Всього	-	-	28,87

Роль біоенергетики в секторі теплопостачання

Біомаса може зробити значний внесок у прямому заміщенні викопних палив при виробництві теплової енергії. В Україні є ряд бар'єрів, які перешкоджають широкому залученню біопалив до цього сектора. Внаслідок монопольного становища підприємств теплокомуненерго в секторі централізованого теплопостачання та недосконалого законодавства, в Україні існують такі проблемні питання в секторі ЦТ: відсутність передумов для конкуренції, відсутність стимулів для підвищення ефективності виробництва теплової енергії, існування бар'єрів для доступу до тепломереж незалежних виробників ТЕ (у т.ч. виробників ТЕ з біомаси), високі тарифи на ТЕ, низькі інвестиції в модернізацію систем ЦТ, відсутність/недостатність інвестицій як наслідок недосконалості існуючих механізмів тарифоутворення («собівартість +6 %»).

Зазначені проблеми можуть бути вирішені шляхом створення в Україні конкурентного ринку теплової енергії. Профільні експерти, у т.ч. фахівці Інституту технічної теплофізики НАН України, протягом вже більше року працюють над даним питанням. Зокрема, вони брали участь у розробці проекту Закону «Про внесення змін до Закону України «Про теплопостачання» щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії» (№ 4334 від 30.03.2016) [2].

Вважаємо, що прийняття цього законопроекту сприятиме розвитку конкурентного ринку теплової енергії. Законопроект прийнято у другому читанні та в цілому 21. 03.2017 р., зараз він очікує на підпис президента. В документі пропонується:

- встановлення органами місцевого самоврядування тарифів на теплову енергію, що виробляється з альтернативних джерел на рівні 90 % від діючого тарифу на тепло з природного газу або середньозваженого тарифу в регіоні для бюджетних установ та населення;
- середньозважений тариф на теплову енергію, вироблену з природного газу для потреб населення та бюджетних установ, розраховується в розрізі адміністративно-територіальних одиниць у затвердженому Кабінетом Міністрів України Порядку.

Законопроект № 4334 вирішує дві нагальні проблеми. Сьогодні при встановленні тарифів на тепло з альтернативних джерел енергії регулятором (НКРЕКП) застосовується принцип «собівартість +6 %». Він перейшов нам у спадок ще з радянських часів і абсолютно не відповідає засадам ринкової економіки сьогодення. Цей принцип «стимулює» виробників теплової енергії завищувати її собівартість, оскільки їхня рентабельність дорівнюватиме 6 % від собівартості. А платити за збільшену собівартість ТЕ приходиться споживачам. Крім того, нинішній принцип тарифоутворення абсолютно не спонукає ані підприємства теплокомуненерго, ані приватних інвесторів вкладати кошти в інноваційні проекти, а у держави і комунальних підприємств коштів на це немає.

Ще один недолік чинної практики встановлення тарифів на ТЕ наступний. До прийняття у вересні

2016 року Закону України «Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг» (№ 1540-VIII від 22.09.2016) [3] всі виробники теплової енергії з альтернативних джерел затверджували свій тариф в НКРЕКП. Оскільки їх кількість вже зараз понад 300, регулятор був перевантажений і не міг затвердити ці тарифи в короткі терміни. Типові очікування виробниками затвердження їхніх тарифів становили до 3...6 місяців. Після прийняття даного закону всі виробники теплової енергії з альтернативних джерел повинні затверджувати свій тариф в органах місцевого самоврядування. Проте, затвердженої Кабінетом Міністрів методики для цього досі не розроблено. Це створило проблему для нових виробників: НКРЕКП вже не затверджує тарифи на ТЕ, а органи місцевого самоврядування ще не можуть цього робити.

Проект Закону «Про внесення змін до Закону України «Про теплопостачання» щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії» (№ 4334 від 30.03.2016), власне, і спрямований на вирішення зазначених проблем. Він передбачає встановлення тарифів на тепло з АДЕ органами місцевого самоврядування за простою та зрозумілою формулою, яка не вимагає складних розрахунків і перевірок. Такий тариф забезпечує мінімально прийнятний рівень рентабельності для залучення інвестицій в сектор виробництва теплової енергії.

Важливо, що законопроект № 4334 не створює преференцій якомусь одному альтернативному джерелу енергії. Його дія розповсюджується на тепло з усіх АДЕ, до яких згідно Закону України «Про альтернативні джерела енергії» [4] відносяться всі відновлювані джерела енергії (у т.ч. біомаса, біогаз, теплові насоси, енергія сонця, геотермальна енергія), а також скидний енергопотенціал технологічних процесів, шахтний метан, горючі промислові гази.

Розвиток конкурентного ринку біопалив в Україні

Поточний темп росту сектору біоенергетики в Україні, хоча і є динамічним, все ж таки недостатньо високий для досягнення цілей Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року [5] (рис. 1). Згідно НПДВЕ, внесок біомаси у загальне споживання теплової енергії у 2020 р. має становити 5 млн. т н.е., що еквівалентно річному заміщенню природного газу у обсязі близько 7,2 млрд. м³.

Досягнення цілей НПДВЕ по біоенергетиці суттєво залежить від успіху створення конкурентного ринку біопалива в Україні. На сьогодні ринок паливної біомаси в країні є недостатньо розвиненим. Дві основні проблеми цього ринку полягають в існуванні обмежень вільного доступу всіх зацікавлених компаній до ресурсів біомаси та у відсутності організованих форм купівлі-продажу різних видів біопалива. Вважаємо за необхідне створення конкурентного ринку біопалива в Україні шляхом: 1) забезпечення вільного доступу підприємств всіх форм власності до відходів або побічної продукції лісового та сільського господарства, 2) заснування біопаливної біржі/аукціону для реалізації операцій купівлі-продажу різних видів біопалива.

Для впорядкування питання доступу до лісових ресурсів пропонуємо увести практику та унормувати процедури укладання угод між державними лісовими господарствами та зацікавленими підприємствами на заготівлю та складування всіх видів деревного палива (зокрема, дров, хмизу, тріски і т.п.) та сировини для виробництва твердого біопалива власним або орендованим обладнанням і затвердити стандартний договір, необхідний для проведення таких заходів. Аналогічні пропозиції відносяться до забезпечення зацікавленим підприємствам можливості виконувати заготівлю неліквідної деревини при проведенні санітарних та інших рубок догляду.

Для запровадження та розвитку конкурентного ринку паливної біомаси в Україні вважаємо за необхідне створити біржу біопалива з такими основними характеристиками:

- На біржі виконуються операції купівлі-продажу деревного палива (гранули, брикети, тріска, дрова) та біомаси аграрного походження (тюкована солома, стебла, гранули, брикети).
- Всі види біопалива на біржі повинні відповідати мінімальним стандартам якості, які мають бути розроблені та доведені до відома учасників біржі.
- Розрахунок за поставлене біопаливо виконується не за обсяг (м³) або масу (т), а за МВт·год, тобто залежить від його теплотворної здатності.
- Біржа біопалива функціонує у всіх областях України через її філіали (один філіал у кожній області). Спочатку буде запущено «пілотну» біржу в одній з областей на 6 міс., потім з урахуванням результатів її роботи буде створено філіали біопаливної біржі у всіх областях України.
- В торгах мають право брати участь державні та приватні компанії, в тому числі іноземні. Пріоритетність доступу компаній до торгів: а) підприємства з області, де відбуваються торги, б) підприємства з інших областей України, в) іноземні компанії.

Висновки

Поточні темпи розвитку сектору біоенергетики в Україні є недостатніми для досягнення цілей Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року. Для виконання цілей НІДВЕ по біоенергетиці вважаємо за необхідне створення в країні конкурентних ринків теплової енергії та біопалива. Прийняття проекту Закону «Про внесення змін до Закону України «Про теплопостачання» щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії» (№ 4334 від 30.03.2016) сприятиме розвитку конкурентного ринку теплової енергії. Для створення конкурентного ринку біопалива в Україні необхідно забезпечити вільний доступ підприємств всіх форм власності до відходів або побічної продукції лісового та сільського господарства, а також заснувати біопаливну біржу для реалізації операцій купівлі-продажу різних видів біопалива.

ЛІТЕРАТУРА

1. Енергетичний баланс України за 2015 рік. Експрес-випуск Державної служби статистики України № 455/0/08.4 вн-16 від 20.12.2016.
2. *Проект Закону* «Про внесення змін до Закону України «Про теплопостачання» щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії» (№ 4334 від 30.03.2016) http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=58568
3. *Закон України* «Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг» (№ 1540-VIII від 22.09.2016) <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/1540-19>
4. *Закон України* «Про альтернативні джерела енергії» (№ 555-IV від 20.02.2003) <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/555-15>
5. *Розпорядження КМУ* «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року» № 902-р від 01.10.2014 <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>

STATE OF THE ART AND PROSPECTS FOR BIOENERGY DEVELOPMENT IN UKRAINE

Geletukha G.G., Zheliezna T.A.

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

The paper presents analysis of the place of biomass in Ukraine's energy balance and the role of bioenergy in achieving the goals set by the National Renewable Energy Action Plan. The potential of biomass for energy in Ukraine is assessed and analyzed. It is shown that the main parts of the potential are agricultural residues/by-products and energy crops. It is also shown that though the rate of bioenergy growth is quite dynamic, it is not high enough to meet the goals set by NREAP. To achieve the goals, it is necessary to create the competitive heat and biofuel markets in Ukraine. Main problems of heat tariffs setting and current state of biofuel market are considered. Ways for creating the competitive heat and biofuel markets in Ukraine are suggested. Current problems of the biofuel market are the restricted access of interested companies to biomass resources and absence of organized trade forms for biofuels. To settle the matter of access to the forest resources, we suggest to introduce the practice and norms for concluding contracts between state forestry enterprises and interested companies for the harvesting and storage of all types of wood fuel (in particular, fuelwood, brushwood, wood chips) and also feedstock for the production of solid biofuels by own or rented equipment; to approve the standard contract for such activity. To create the competitive biofuel market, it is necessary to establish a biomass exchange in Ukraine.

References 5, table 1, figure 1.

Key words: bioenergy, biomass, biofuel, biomass potential, alternative energy sources, heat market, biofuel market.

1. *Enerhetychnyi balans Ukrainy za 2015 rik. Ekspres-vypusk Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy* № 455/0/08.4 vn-16 vid 20.12.2016 [Energy balance of Ukraine for 2015. Express-issue by State Statistics Service of Ukraine № 455/0/08.4 vn-16 of 20.12.2016]. (Ukr.)

2. *Proekt Zakonu «Pro vnesennia zmin do Zakonu Ukrainy «Pro teplopostachannia» shchodo stymuliuvannia vyrobnytstva teplovoi enerii z alternatyvnykh dzherel enerhii»* (№4334 vid 30.03.2016) [Draft Law “On amending Law of Ukraine “On Heat Supply” regarding the stimulation of heat production from alternative energy sources (№4334 of 30.03.2016)] (Ukr.) http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=58568

3. *Zakon Ukrainy «Pro Natsionalnu komisiuu, shcho zdiisniuie derzhavne rehuliuvannia u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh»* (№ 1540-VIII vid 22.09.2016) [Law of Ukraine “On the National Commission for energy and utility state regulation (№ 1540-VIII of 22.09.2016)] (Ukr.) <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/1540-19>

4. *Zakon Ukrainy «Pro alternatyvni dzherela enerhii»* (№ 555-IV vid 20.02.2003) [Law of Ukraine “On Alternative energy sources” (№ 555-IV vid 20.02.2003)] (Ukr.) <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/555-15>

5. *Rozporiadzhennia KМУ «Pro Natsionalnyi plan dii z vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2020 roku»* № 902-p vid 01.10.2014 [Resolution by the Cabinet of Ministers of Ukraine “On the National Renewable Energy Action Plan until 2020” № 902-p of 01.10.2014] (Ukr.) <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>

Получено 22.03.2017
Received 22.03.2017

УСУНЕННЯ ЗАГРОЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОМ ІНФРАСТРУКТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Демченко В.Г., канд. техн. наук

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

Проведено аналіз загроз забезпечення тепловою енергією населених пунктів та окремих об'єктів в умовах надзвичайних ситуацій. Розроблені методи та надані рекомендації створення стійкої перспективної системи теплозабезпечення. Запропоновано створення нового та модернізація існуючого обладнання.

Проведен анализ угроз теплоэнергоснабжения населенных пунктов в условиях чрезвычайных ситуаций. Разработаны методы и даны рекомендации создания устойчивой системы теплофикации. Предложено создание нового и модернизация существующего оборудования.

The analysis of threats of providing thermal energy of settlements and separate objects is conducted in the conditions of emergencies. Methods are worked out and recommendations of creation are given of the steady perspective system of providing a heat is worked out. Creation of new and modernisation of existent equipment are offered.

Бібл. 15, рис. 2.

Ключові слова: теплозабезпечення, система, надійність, модернізація, інфраструктура.

ТЕС – теплова електрична станція;

ТП – тепловий пункт;

НС – надзвичайні ситуації;

ДІСО – дискретно-імпульсна системи опалювання;

МТА – мобільний акумулятор теплової енергії.

$X(t)$ – стан системи теплопостачання;

$Q(t)$ – максимальна годинна витрата теплоти;

$\bar{R}(t)$ – показник надійності системи теплопостачання;

$K(t)$ – показник якості функціонування системи;

D_{lim} – детермінований коефіцієнт лімітованого подання теплоносія.

Вступ

Аналізуючи тактику проведення бойових дій низької інтенсивності та гібридної війни як систему, що завдає людські, економічні, культурні й інші втрати, стає зрозуміло, що потрібен пріоритетний захист цивільного населення в місцях його постійного проживання та забезпечення стабільного функціонування інженерної інфраструктури населених пунктів. Такий захист, значною мірою, може бути реалізований шляхом гарантованого забезпечення комунальних і виробничих споживачів необхідними ресурсами в умовах деструктивних дій, основними або вторинними цілями яких є інфраструктурні об'єкти, такі як газопроводи, нафтопроводи, електрогенеруючі потужності, системи теплопостачання, водопостачання і каналізації. Це підтверджує дослідження негативних ефектів військових конфліктів останніх десятиліть на території країн Європи і Близького сходу, де значні збитки виникли за рахунок припинення енергозабезпечення населених пунктів [1, 2].

В зв'язку з цим необхідною умовою є гарантоване забезпечення тепло- та електропостачання. Відсутність теплопостачання упродовж декількох годин при мінусових температурах зовнішнього повітря призведе до виходу з ладу та руйнування системи, виробничого устаткування і виморожування житла, що призведе до того, що населений пункт перестане бути придатним для проживання і ведення повноцінної господарської діяльності.

Постановка задачі

Відомо, що теплопостачання інфраструктурних об'єктів здійснюється тепловими електричними

станціями (ТЕС), районними та автономними котельними і МІНІ-ТЕС. Розподіл теплоти здійснюється з використанням теплових пунктів (ТП), а саме центральних і індивідуальних (ЦТП і ІТП). Частина споживачів отримує теплоту безпосередньо від теплогенеруючих об'єктів. Паливостачання теплогенеруючих об'єктів зазвичай здійснюється за допомогою магістральних газопроводів, іноді – з використанням резервного палива. Електропостачання – переважно від зовнішніх електричних мереж.

При масштабному припиненні енергопостачання відбувається як мінімум часткове припинення вироблення або постачання електроенергії. Часткове теплопостачання може зберегтися тільки на об'єктах, що забезпечуються теплом безпосередньо від МІНІ-ТЕС або від ТЕС, яким вдасться зберегти стабільну роботу турбогенераторів в умовах низьких навантажень і за відсутності зовнішньої електричної мережі, що стабілізує частоту струму. Експлуатація об'єктів, особливо у забезпеченні теплом за допомогою ЦТП і ІТП з розділеними тепловими контурами, зупиняється повністю. Основні групи причин, які можуть привести до аварійної ситуації: – зовнішні чинники природного і техногенного характеру, які обмежують подання первинних ресурсів, таких як паливе, електроенергія і теплоносії; – внутрішні техногенні чинники, пов'язані з відмовами будь-яких компонентів системи теплопостачання; – людський чинник, який може відноситися як до зовнішніх, так і до внутрішніх чинників або їх комбінації; – військові дії, тероризм і саботаж [3].

Системи теплопостачання мають велике економічне і соціальне значення, тому до надійності

їх функціонування пред'являють особливо високі вимоги. Метою даної роботи є розробка рекомендацій по підготовці енергетичного обладнання та устаткування для швидкого налагодження роботи теплопостачання та забезпечення стабільної роботи інфраструктурних об'єктів в умовах надзвичайних ситуацій (НС). Нажаль, в Україні не приділяється достатньої уваги цим актуальним питанням і чинні нормативні документи потребують перегляду [5, 6].

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних завдань: – провести оцінку надійності систем теплопостачання; – сформулювати основні критерії надійності теплових систем та методику їх розрахунку; – розглянути питання проектування та оптимізації теплових мереж для забезпечення надійності експлуатації; – запропонувати методи резервування теплової здатності системи та використання перспективного устаткування об'єктів інфраструктури; – провести оцінювання технічної й економічної доцільності

експлуатації запропонованих установок і технологічних схем в умовах НС.

Керування надійністю систем теплопостачання

Керування надійністю полягає в обґрунтуванні рішень, що забезпечують виконання вимог до сталого теплопостачання споживачів [6, 7].

Перевірка ефективності запланованих до реалізації заходів по забезпеченню надійного теплопостачання споживачів здійснюється шляхом моделювання, розрахунку нових значень показників надійності та їх зіставлення з нормативними значеннями. Якщо означені умови не виконуються, склад заходів включає: – введення або збільшення об'єму резервування мережі шляхом облаштування аварійних перемичок (рис. 1); – зниження часу відновлення теплопостачання після відмов; – секціонування мережі; – збільшення діаметрів теплопроводів; – збільшення тиску теплоносія на колекторах джерела.

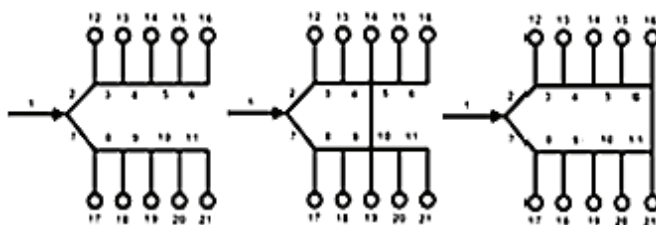


Рис. 1. Збільшення об'єму резервування теплової мережі.

При ухваленні рішень про введення або збільшення об'єму резервування спочатку слід резервувати головну частину мережі та, при необхідності, нарощуючи об'єм резервування до периферії. Діаметри перемичок слід вибирати по найбільшому діаметру суміжних ділянок мережі. Для варіантів резервування моделюються і розраховуються післяаварійні гідравлічні режими, що відповідають відмовам елементів кільцевій частині мережі і перевіряється, чи забезпечуються споживачі під час ліквідації нормою аварійної подачі теплоти. Розробка рекомендацій, моделювання і аналіз результатів виконуються послідовними ітераціями до тих пір, поки буде знайдений оптимальний варіант програми заходів, що дозволяє в перспективі підвищити надійність теплопостачання споживачів до потрібного нормативами рівня [8].

Системи теплопостачання відносяться до складних технічних систем, тому їх надійність, включаючи резервовану і нерезервовану частини, оцінюють показниками якості функціонування. Кожному стану системи теплопостачання $\tilde{X}(t)$ дається порівняльна розрахункова максимальна годинна витрата теплоти $\dot{Q}_x(t)$. Ця витрата залежить тільки від стану системи і дає чисельну оцінку можливості виконання завдання. В процесі функціонування системи вектор $\tilde{X}(t)$ змінюється випадковим чином, за таким же законом змінюється і характеристика якості функціонування $\dot{Q}_x(t) = \dot{Q}_x[\tilde{X}(t)]$. За показник якості функціонування системи у момент t приймається математичне очікування випадкової

функції $\dot{Q}_x[\tilde{X}(t)]$, як середнє значення безлічі спостережень випадкового процесу.

Показник надійності системи теплопостачання $R(t)$ визначають, як відношення показника якості функціонування реальної системи $K(t)$ до показника якості ідеальної системи $K''(t)$. Ідеальна система знаходиться в справному стані і всі компоненти вектору $\tilde{X}(t)$ дорівнюють одиниці

$$R(t) = K(t) / K''(t).$$

При різних станах системи $\tilde{X}(t)$ в аварійному стані знаходиться різне число споживачів і сумарна недостача теплоти визначає зниження показника якості функціонування. Такий підхід дещо не коректний до джерел теплоти і насосних станцій, але відповідає поняттю відмови, по теорії надійності і прийнятій нами характеристиці якості функціонування системи.

Показник надійності системи теплопостачання $R(t)$ має імовірнісний характер і визначає структуру, структурний резерв й імовірнісну надійність системи теплопостачання. Для визначення транспортного резерву з урахуванням діаметрів трубопроводів, допустимого зниження температури усередині будівлі, обліку теплоакumuлюючої здатності об'єкту дослідження і часу усунення аварії для проведення розрахунків вводиться детермінований коефіцієнт лімітованого подання теплоносія D_{lim} .

Обидва показники дають уявлення про надійність системи теплопостачання в цілому. Зважаючи на складність визначення даних, в розрахунках показника

D_{lim} його прийнято приймати по числових значеннях вибраного діапазону виміру початкової інформації [9].

Слід зазначити, що ці показники застосовуються при проектуванні теплових мереж. Підготовка теплових мереж до експлуатації в аварійних режимах призводить до додаткових капітальних витрат, але міняє пропускну спроможність системи, що дозволяє економити електричну енергію на циркуляцію теплоносія.

Живучість системи

Мінімальне подання теплоти по тепломережам, розташованим в неопалюваних приміщеннях і зовні, в під'їздах, сходових клітинах, на горищах і тому подібне, повинно забезпечувати температуру води впродовж усього ремонтно-відновного періоду не нижче 3 °С. У проектах резервування мають бути розроблені заходи по забезпеченню живучості елементів систем теплопостачання, можливих дій негативних температур, у тому числі:

- організація локальної циркуляції мережевої води в теплових мережах до і після ЦТП;
- спуск мережевої води з систем теплопостачання у споживачів, розподільних теплових мереж, транзитних і магістральних теплопроводів;
- прогрів і заповнення теплових мереж і систем теплопостачання споживачів в час і після закінчення ремонтно-відновних робіт;
- перевірка елементів теплових мереж на достатність запасу міцності устаткування і компенсуючих пристроїв;
- забезпечення необхідного закріплення безканальних теплопроводів при можливих затопленнях;
- тимчасове використання пересувних джерел теплоти.

Методи та рекомендації створення стійкої системи теплозабезпечення

При проектуванні нових теплових мереж може бути використана тритрубна система транспорту теплоносія. В цьому випадку по одному з теплопроводів теплоносій подається споживачеві, а по двом іншим повертається назад. У разі аварії пошкоджений трубопровід відключається, а для опалювання використовуються робочі. Можливий варіант тритрубною системи, коли два теплопроводу – подаючі, а один – зворотний. В цьому випадку влаштовують додаткові перемички між ними, які дозволяють регулювати напрям руху теплоносія. З точки зору стабільності гідравлічних режимів і ремонтпридатності тритрубна тепломагістраль прийнятніша за двотрубну. Проте капітальні витрати на її будівництво на 30 % є вищими.

Нами провадяться дослідження систем централізованого опалення, а саме: теплофізичні дослідження процесів та технологій у теплоенергетичному обладнанні та розробка методів підвищення ефективності його роботи, надійності та екологічної безпеки. Наприклад, теоретично розроблено обґрунтування транспорту теплоносія при проектуванні коаксіальних теплових мереж. Проведено математичне моделювання, визначені умови ефективності, розроблена конструкторська технічна документація для виго-

товлення коаксіальних теплопроводів. Сформульовані критерії ефективності використання коаксіальних труб для будівництва нових та модернізації існуючих теплових мереж. Доведено, що капітальні витрати на будівництво, в порівнянні з двотрубною тепломережею, на 30 % нижчі, а стійкість до зовнішніх чинників при експлуатації – значно вищі [10,11].

Для локального опалювання окремих приміщень можуть бути використані печі тривалого горіння "Рекорд", розробки ІТТФ НАНУ [12,13]. Призначення: для опалювання житлових та допоміжних приміщень площею 20...40 м² та для приготування їжі. Технічні характеристики: номінальна теплопродуктивність – від 2 кВт до 4 кВт; вид палива – тріска, дерев'яні пелети, дрова, буре вугілля, торф, злаки, солома; температура вихідних газів – до 200 °С; ККД = 75 %; низька емісія забруднюючих речовин; вага – 50 кг. Переваги: підтримання заданої температури в приміщенні $\approx$ 20 °С при мінімальних витратах палива; додаткове обладнання печі дозволяє виробляти електричну енергію 12 В, 100 Вт [14].

Традиційні тепломережі характеризують значні втрати теплоти, нетривалі терміни експлуатації й уразливість при НС. Нами запропонований мобільний тепловий акумулятор МТА для транспортування теплової енергії та впровадження дискретно-імпульсної системи опалювання ДІСО на протигагу звичайній системі теплопроводного транспорту. На рис. 2 наведена технологічна схема теплопостачання ДІСО. Очікується, що хімічні акумуляуючі системи зберігання теплоти дають значно більш високу щільність зберігання теплоти, ніж вода. Згідно літературних джерел, на цьому принципі в Німеччині проходить випробування пілотний проект з тринадцятитонним контейнером-теплоакумулятором [15]. Теплова потужність теплоакумулятора дорівнює 500 кВт, температура – 180 °С, що дає змогу отримати близько 3,5 МВт·год. на одному циклі заряджання. Дистанція транспортування автомобілем від джерела теплоти (скидна теплота хімічного процесу) до споживача складає 10 км. Система акумуляції за допомогою водяного об'єму 5000...10000 м³ дозволяє отримати 70...90 кВт/м³ в той час, як використовували нами солігидрати – до 280 кВт/м³.

Запропонована технологічна схема ДІСО дозволяє використовувати всі відомі види газових та рідких палив, твердих відходів, біологічних палив, альтернативних джерел теплоти, тощо. Інтеграція МТА в систему центрального та автономного опалення значно зменшує собівартість теплової енергії, збільшує акумуляуючу здатність системи теплопостачання, сприймає пікові навантаження та має екологічну привабливість. ДІСО дозволяє відмовитися від транспортування теплоносія магістральним теплопроводним транспортом. Таке рішення дозволяє виконати транспортування теплової енергії наземним, морським, річковим та навіть повітряним транспортом. У випадку стаціонарного розміщення МТА в системах централізованого теплопостачання та системах опалення окремих об'єктів виникає можливість сталого теплозабезпечення не тільки в мирний час, але і в період ведення бойових дій

та надзвичайних ситуацій. Окрім того, це призведе до підвищення енергоефективності роботи міських систем теплопостачання, економії традиційних органічних

палив, зменшення питомої вартості виробництва та доставки одиниці теплової енергії кінцевому споживачеві, зменшення концентрації шкідливих викидів тощо.

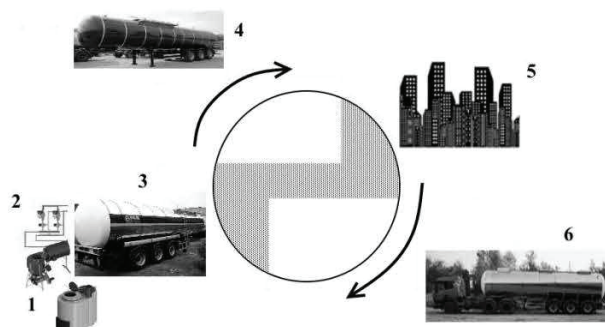


Рис. 2. Система теплопостачання ДІСО.

**1 – теплогенератор; 2 – водяний циркуляційний контур; 3 – теплоаккумулятор МТА;
4 – подача теплоносія; 5 – споживач; 6 – повернення МТА на зарядку.**

Висновки

Створення методичних засад, устаткування й обладнання для усунення загрози інфраструктурній безпеці населених пунктів є актуальною державною задачею. Її вирішення дозволить:

- створити стійку систему теплозабезпечення як до терористичних атак, так і до руйнівних природних явищ, у тому числі кліматичних катастроф локального і глобального характеру;
- попередню підготовку об'єктів інженерної інфраструктури до експлуатації в умовах НС;
- широке використання місцевих, у тому числі поновлюваних джерел енергії при відсутності традиційних видів палива;
- економічна ефективність автономних систем дозволяє забезпечити наявність раціонального терміну окупності, порівняно з існуючими централізованими системами теплопостачання. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання запропонованих технічних рішень і створення нової системи теплопостачання ДІСО для подальшого впровадження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Pederson P., Dudenheffer D., Hartley S., Permann M. Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of U.S. and International Research – Idaho Falls, Idaho: Idaho National Laboratory, 08.2006, 126 p.
2. Кондратьев А. Современные тенденции в исследовании критической инфраструктуры в зарубежных странах - М: Зарубежное военное обозрение № 1, 2012 год, 19–30 с.
3. Руководство по передовой практике защиты важнейших объектов неядерной энергетической инфраструктуры от террористических актов в связи с угрозами, исходящими от киберпространства – Вена: ОБСЕ, Oberreuter Print GmbH, 2013 год, 96 с.

4. ПРАВИЛА технічної експлуатації теплових установок і мереж, затверджено наказом Мінпаливенерго України 14.02.2007 № 71 зі змінами і доповненнями, від 12 січня 2010 року.

5. Постанова КМУ №397 від 17.05.2012р., Середньострокові пріоритетні напрями інноваційної діяльності галузевого рівня на 2017–2021 с.

6. ПРАВИЛА технічної експлуатації систем теплопостачання комунальної енергетики України, зі змінами від 29.12.2004 .

7. ДБН В.2.5-39:2008, ТЕПЛОВІ МЕРЕЖІ, Мінрегіонбуд України.

8. Методика и алгоритм расчета надежности тепловых сетей при разработке схем теплоснабжения городов – М: Газпромпромгаз, 2013 – 105 с.

9. Ионин А.А. Надёжность систем тепловых сетей. – М: Стройиздат, 1989 – 268 с.

10. Демченко В.Г., О.В. Дуняк О.В., Євтушенко О.В. Порівняльна оцінка ефективності системи транспортування теплоносія на базі коаксіальних труб, Промышленная теплоэнергетика – 2016 – Т.38, № 5. – с. 39–47.

11. Патент України на корисну модель № 105366 «Двотрубна теплова мережа з коаксіально розташованими трубопроводами», 10.03.2016р.

12. Демченко В.Г. Організація виробництва та впровадження вітчизняних опалювально-варильних печей, Промышленная теплотехника. – 2014 – Т.36, №6. – С. 29–38.

13. Патент України на корисну модель № 111623 «Опалювально-варильна піч», 25.11.2016р.

14. Патент України на корисну модель № 106667 «Водяний охолоджувач термоелектричного генератора», 10.05.2016р.

15. Thermal Energy Storage | Technology Brief, IEA-ETSAP and IRENA© Technology Brief E17 – January 2013, pp. 10–13.

REMOVAL THREATS OF PROVIDING HEAT OF INFRASTRUCTURAL OBJECTS

V. Demchenko

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

In this article the threats of providing thermal energy of settlements are set forth in the period of conduct of battle actions and emergencies. Management questions are considered by the system of providing and preparation of objects a heat to the emergency external environments. Reliability indexes and mathematical vehicle are indicated for realization of calculations. Considered requirement to vitality of the heating system. Methods and equipment are offered for creation of the steady system heating having large prospects.

References 15, figures 2.

Key words: providing, heat system, reliability, modernisation, infrastructure

1. Pederson P., Dudenheffer D., Hartley S., Permann M. Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of U.S. and International Research. Id ahoy Falls, Idaho: Idaho National Laboratory, 08.2006, 126 p.

2. Kondratyev A. The Modern tendencies in research of critical infrastructure in foreign countries. M: Foreign military review № 1, 2012 year, 19–30 p.

3. *Anführung fuer fortgeschrittene Praktik des Schutz der vornehmsten Objekte der nicht Kernenergie der Infrastruktur ab terroristischen Akten gelegentlich Androhungen, die ab Kibersraums.* Vienna ausgehend ist: OBSE, Uberreuter Print GmbH, 2013 Jahr, 96 c.

4. *RULES of technical exploitation* of thermal options and networks, by the ratified order of Mintopenergy of

Ukraine 14.02.2007 N 71 with changes and additions, from January, 12, 2010.

5. *Decision of KMY №397* from 17.05.2012., Medium-term priority directions of innovative activity of branch level on 2017–2021.

6. *RULES of technical exploitation* of the systems of providing with a heat of communal energy of Ukraine, with changes from 29.12.2004.

7. *DBN B.2.5-39: 2008, THERMAL NETWORKS*, Minregionbud Ukraine.

8. *Methodology and algorithm of calculation* of reliability of thermal networks at development of charts of of providing with a heat of cities are M: Gasprom promgas, 2013. 105 p.

9. *Ionin A.A.* Reliability of the systems of thermal networks. it is M. Stroyizdat, 1989. 268 p.

10. *Demchenko V.G., O.V. Dunjak O.V., Ewtuschenko O.V.* Comparative estimation of efficiency of the system of transporting of coolant-moderator on the base of coaxial pipes, Industrial thermal energy. 2016. T.38, № 5. p. 39–47.

11. *Patent of Ukraine* on a useful model № 105366 the "2-pipe thermal network with the coaxially located pipelines", 10.03.2016p.

12. *Demchenko V.G.* Organization of production and introduction home for heating-cooking stoves, Industrial heating engineering. 2014. T.36, №6. C. 29–+9+38.

13. *Patent of Ukraine* on an useful model № 111623 "Heating-cooking stoves", 25.11.2016.

14. *Patent of Ukraine* on an useful model № 106667 the "Aquatic cooler of thermo-electric generator", 10.05.2016.

15. *Thermal Energy Storage* | Technology Brief, IEA-ETSAP and IRENA© Technology Brief E17. January 2013, pp. 10–13.

Получено 07.04.2017

Received 07.04.2017

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И РАДИАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА И РАЗРУШЕННОГО БЛОКА ЧАЭС НА ОСНОВЕ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Круковский П.Г., доктор техн. наук, Метель М.А., Полубинский А.С., канд. техн. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев-57, 03057, Украина

В роботі розглядаються призначення і конструкція Нового Безпечного Конфайнменту (НБК), що збудований та насунутий на Об'єкт «Укриття» (ОУ) Чорнобильської АЕС. Обґрунтовується необхідність аналізу та прогнозування сумісних термогазодинамічних та вологісних процесів в ОУ і НБК, які визначають 100-річний ресурс НБК.

Для цього розроблена тривимірна комп'ютерна CFD-модель, яка на засаді аналізу вказаних вище процесів дозволяє також аналізувати процес розповсюдження радіоактивних аерозолів у об'ємах ОУ, НБК і оточуючого середовища.

Библ. 1, рис. 4.

Ключевые слова: Новый Безопасный Конфайнмент, тепло- и массообмен, радиоактивное загрязнение, CFD-моделирование.

Новый Безопасный Конфайнмент (НБК), построенный в течение 5 лет и надвинутый на Объект «Укрытие» (ОУ) Чернобыльской АЭС в ноябре 2016г. (рис. 1), является защитным сооружением, включающим в себя оборудование для извлечения из разрушенного 4-го энергоблока ЧАЭС материалов, содержащих ядерное топливо, преобразования этого энергоблока в экологически безопасную систему и обеспечения безопасности персонала, населения и окружающей среды. НБК представляет собой комплекс из трех инженерно-технических решений: стальных конструкций в виде Арки, накрывающих Объект «Укрытие» (ОУ), технологического здания, расположенного в западной части Арки, где установлено большинство систем жизнеобеспечения и контроля [1].

Для обеспечения защиты окружающей среды и гарантирования долговременного сопротивления коррозии, структурная часть Арки (рис. 1, позиция 1) внутри и снаружи обшита двумя металлическими оболочками, – внешней 2 и внутренней 3. Пространство между оболочками Арки называется кольцевым (межарочным) пространством, а объем между внутренней оболочкой и строениями под Аркой называется основным объемом.

В кольцевом пространстве и основном объеме предусмотрены системы вентиляции, которые будут обеспечивать требуемый режим влажности (с целью снижения до минимума коррозии металлических конструкций кольцевого пространства) и предотвращать попадание аэрозольных выбросов в окружающую среду, которые

В работе рассматриваются назначение и конструкция Нового Безопасного Конфайнмента (НБК), построенного и надвинутого на Объект «Укрытие» (ОУ) Чернобыльской АЭС. Обосновывается необходимость анализа и прогнозирования совместных термогазодинамических и влажностных процессов в ОУ и НБК, которые определяют 100-летний ресурс НБК. Для этого разработана трехмерная компьютерная CFD-модель, которая на основе анализа указанных выше процессов позволяет также анализировать процесс распространения радиоактивных аэрозолей в объемах ОУ, НБК и окружающей среде.

This paper deals with the purpose and design of the New Safe Confinement (NSC), which was built and slide over Object "Shelter" (OS) of the Chernobyl nuclear power plant.

The justification of necessity analyzing and forecasting providing for joint termogazodynamic and humidity processes in the OS and the NSC, which determine the 100-year lifetime for NSC. A 3D CFD-computer model was developed, which allows also to analyze the radioactive aerosols propagation in the OS and NSC volumes as well as the environment on the base of above mentioned processes.

могут возникнуть в основном объеме Арки при демонтаже конструкций ОУ.

НБК, который спроектирован, построен и надвинут на ОУ консорциумом VINCI Construction Grands Projets / Bouygues Travaux Publics NOVARKA (НОВАРКА), должен предотвратить утечки радиоактивных материалов из разрушенного реактора №4 в окружающую среду при его разборке. Общие геометрические размеры Арки НБК составляют: высота около 109 м, длина около 164 м, ширина около 260 м. Объем воздуха между внутренней и внешней обшивками Арки НБК (кольцевое пространство, рис. 1, поз. 1), составляет около 1,0 млн. м³, а основного объема НБК внутри Арки – около 1,4 млн. м³. Объем Объекта «Укрытие» составляет около 1,0 млн. м³. Общий вес Арки составляет около 33 тыс. тонн.

Одной из важных инженерных систем НБК является система вентиляции, которая прежде всего должна обеспечить требуемый режим относительной влажности (не более 40 %) и уровень превышения давления воздуха (50...75 Па) в кольцевом пространстве Арки НБК, а также вентиляцию и поддержание слабого вакуума (≈ -5 Па) в основном объеме Арки НБК при различных метеорологических условиях. Необходимость поддержания низкого уровня относительной влажности в кольцевом пространстве Арки НБК продиктована требованием снижения до минимума коррозии металлических конструкций, расположенных в кольцевом простран-

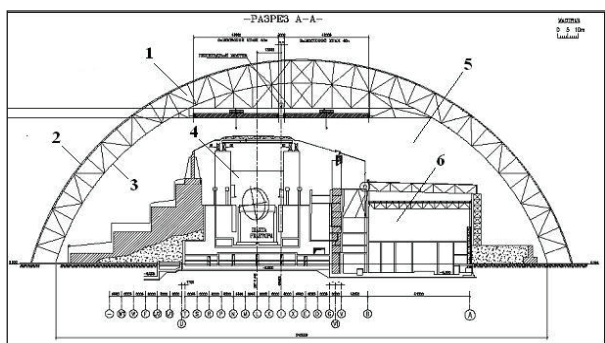
стве, для обеспечения 100-летнего ресурса Арки НБК.

Система вентиляции состоит из двух подсистем, - подсистемы вентиляции и осушения кольцевого пространства для обеспечения указанного выше уровня относительной влажности воздуха и подсистемы вентиляции основного объема НБК для обеспечения поступления свежего воздуха в места работы персонала НБК и отвода воздуха из мест с наибольшим количеством радиоактивных аэрозолей, прежде всего пространства над ОУ.

Поскольку влажностный режим воздушных объемов Арки НБК напрямую зависит от температурного и газодинамического режимов в этих объемах, то для деталь-

ного анализа работоспособности системы вентилиции НБК необходима разработка инструмента, способного выполнить такой анализ. В качестве такого инструмента было выбрано трехмерное CFD (Computational Fluid Dynamic)-компьютерное моделирование.

Целью статьи является описание выбранной модели и основных результатов ее применения для детального анализа и прогнозирования совместных термогазодинамических и влажностных процессов в ОУ и НБК, которые зависят от работоспособности системы вентиляции НБК и определяют его 100-летний ресурс, а также для анализа процесса распространения радиоактивных аэрозолей в объемах ОУ, НБК и окружающей среде.



а)



б)

Рис. 1. Схема Объекта «Укрытие» и Нового Безопасного Конфайнмента в поперечном сечении (а) и их фото после надвигки НБК на ОУ (б).

На рис. а: 1 – стальные конструкции и кольцевое пространство Арки НБК, 2 – наружная оболочка, 3 – внутренняя оболочка, 4 – Объект «Укрытие» и разрушенный реактор, 5 – основной объем НБК, 6 – маизал.

Физическая модель температурных и газодинамических процессов, происходящих в НБК, представляется следующей. Температурно-влажностный режим в кольцевом пространстве Арки НБК, основном объеме и в строительных конструкциях ОУ формируется в результате сложного взаимодействия происходящих там аэродинамических и тепломассообменных процессов (рис. 1). Это процессы: теплопроводности через элементы строительных конструкций, конвективный теплообмен между воздушными потоками и поверхностями Арки НБК и ОУ, смешение поступающих в объем кольцевого пространства (КП) и основной объем Арки НБК (а также отводимых из указанных объемов) воздушных потоков с различной температурой и влажностью, тепло, поступающее в основной объем из ОУ (разрушенного блока №4) от системы освещения Арки и из деаэрационной этажерки.

Основным источником тепlopоступления в КП в летний период является солнечная радиация и конвективный теплоподвод от ветрового потока, воздействующего на внешнюю поверхность Арки. Тепловые потоки с внешней поверхности Арки посредством теплопроводности через металлические элементы конструкции Арки НБК передаются в межарочное воздушное пространство и основной объем НБК.

В зимний период основными механизмами теплоотвода с внешней поверхности Арки в окружающее пространство также является радиационно-конвективный теплоперенос.

Другими источниками тепlopоступления в кольцевое пространство являются потоки осушенного и подогретого воздуха, нагнетаемого из окружающей среды, а также подогреваемые рециркуляционные воздушные потоки. Эти воздушные потоки формируются путем отбора воздуха из кольцевого пространства, его подогрева до определенной температуры и последующего возвращения в объем кольцевого пространства. Отвод теплоты из кольцевого пространства, кроме тепlopотерь в зимний период, происходит также за счет инфильтрационных перетоков воздуха через неплотности в оболочках арочных конструкций во внешнюю воздушную среду и основной объем Арки НБК. Указанные воздушные перетоки возникают вследствие организации повышенного давления (на 50...75 Па) относительно окружающей среды) в кольцевом пространстве, что должно исключить неорганизованное проникновение в кольцевое пространство влажного воздуха из внешней среды, а также исключить проникновение радиоактивных аэрозолей выбросов из основного объема через кольцевое пространство в окружающую среду.

Температурно-влажностный режим основного объема Арки НБК формируется за счет:

- радиационно-конвективного взаимодействия поверхностей внутренней оболочки Арки с поверхностями конструкций кольцевого пространства и строительными конструкциями ОУ;
- проникновения воздуха и влаги из окружающей среды через щели между вертикальными стенами Арки НБК и строительными конструкциями ОУ (рис. 1, б, позиции 1, 2);
- потоков теплоты и массы из кольцевого пространства в основной объем;
- источников внутреннего тепловыделения в ОУ и осветительных приборах;
- подачи и удаления воздуха в основном объеме системой приточно-вытяжной вентиляции;
- переноса теплоты из и в основной объем Арки НБК от поверхности грунта и фундаментов, на которых расположен НБК.

- тепловой емкости массивных металлических конструкций Арки НБК, массивных бетонных конструкций ОУ, грунта и фундамента, на которых расположен НБК при рассмотрении длительных нестационарных процессов дневных, месячных и годовых циклов.

Температурно-влажностный режим этого объема Арки должен быть таким, чтобы давление в нем было несколько ниже, чем давление воздуха в кольцевом пространстве, а также в окружающем пространстве. При таких условиях исключается самопроизвольный переток загрязненного воздуха из основного объема Арки НБК во внешнюю окружающую среду и междуарочное кольцевое пространство, в котором необходимо поддерживать требуемые тепловлажностные условия воздушной среды.

Для выполнения работы была создана 3D CFD-модель, включающая в себя как части модели Арки НБК, так и всех объектов под Аркой, включая Объект «Укрытие», грунты и фундаменты (рис. 2).

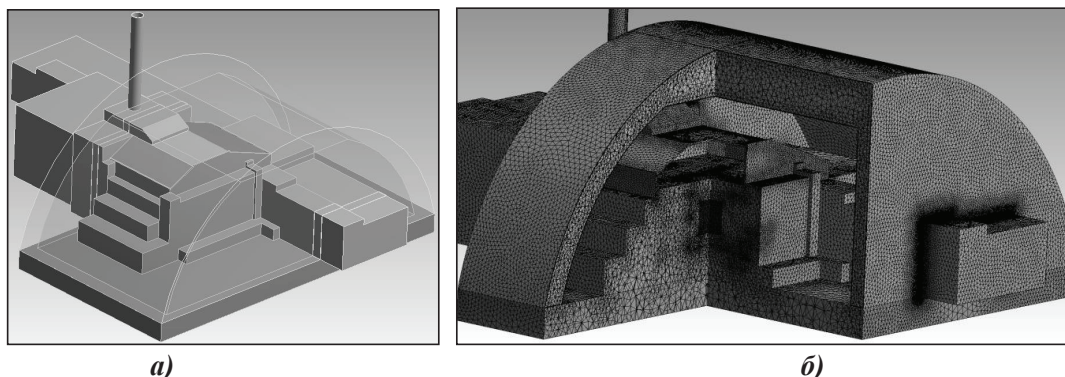


Рис. 2. Части геометрической (а) и сеточной моделей Арки НБК (б) и всех объектов под Аркой, включая Объект «Укрытие», грунты и фундаменты.

На внешней оболочке Арки НБК имеют место естественные условия сопряженного радиационно-конвективного теплообмена и условия массообмена слабофильтрующегося воздуха и влажности между поверхностями оболочки и внешней средой при различных направлениях и силе ветра, обтекающего НБК. Между всеми твердыми поверхностями НБК, ОУ, поверхностью земли и воздухом, обтекающим эти поверхности, также задавались условия сопряженного теплообмена. Воздухо- и влагообмен между основным объемом и окружающей средой осуществлялся посредством системы вентиляции и протечек воздуха и влаги из окружающей среды через щели между вертикальными стенами Арки НБК и строительными конструкциями ОУ. Величина этих протечек также зависит от направления и силы ветра, обтекающего НБК. Влияние земли и фундаментов учитывалось посредством включения в основную модель области решения и дополнительной сетки, охватывающей грунт и фундаменты под Аркой НБК на глубину 15 м (рис. 2). Температура грунта на глубине 15 м стабильная и принималась равной 10 °С.

Разработанная и кратко описанная выше модель термогазодинамических и влажностных процессов в воздушных объемах Арки НБК, всех строительных кон-

струкциях ОУ и фундаментах и грунтах под ними была использована для детального анализа распределения температур и влажности в кольцевом и основном объемах НБК и ОУ при различных климатических условиях в стационарных и нестационарных режимах, а также прогнозировании тепловлажностного состояния ОУ и НБК при отказах различных частей вентиляционного оборудования. На рис. 3 приведен пример такого распределения температур и влажности в кольцевом и основном объемах НБК и ОУ при стационарном режиме в летнее время при температуре окружающего воздуха 30 °С, относительной влажности 100 % и отсутствии ветра.

Проведенные исследования показали, что система вентиляции в целом работоспособна в диапазоне заданных климатических условий с изменением температуры окружающего воздуха от -22 до +30 °С, относительной влажности от 50 до 100 % и силе ветра от 0 до 25 м/с. Временное превышение уровня влажности в кольцевом пространстве наблюдалось лишь при силе ветра, превышающей 7,2 м/с.

Поскольку разработанная модель позволяет рассчитывать потоки воздуха как внутри НБК и ОУ, так и внешнее обтекание НБК, она также может моделиро-

вать распространение радиоактивных аэрозолей (РА) из разрушенного реактора либо в виде второй фазы, либо в виде дискретных частиц, переносимых этими воздушными потоками (рис. 4). Моделирование переноса массы пыли со средним диаметром 5 мкм производится в единицах $\text{кг}/\text{м}^3$, а распределения концентрации пересчитываются через весовую активность радиоактивной пыли Бк/кг для 1 кг пыли.

Такая возможность очень важна для анализа радиационного состояния внутреннего воздушного пространства НБК, где работает персонал (рис. 4, в), а также для анализа распространения РА за пределы НБК в окружающую среду (рис. 4 а, б).

Авторы выражают благодарность компании NOVARKA и программе SPS NATO за финансовую поддержку работы.

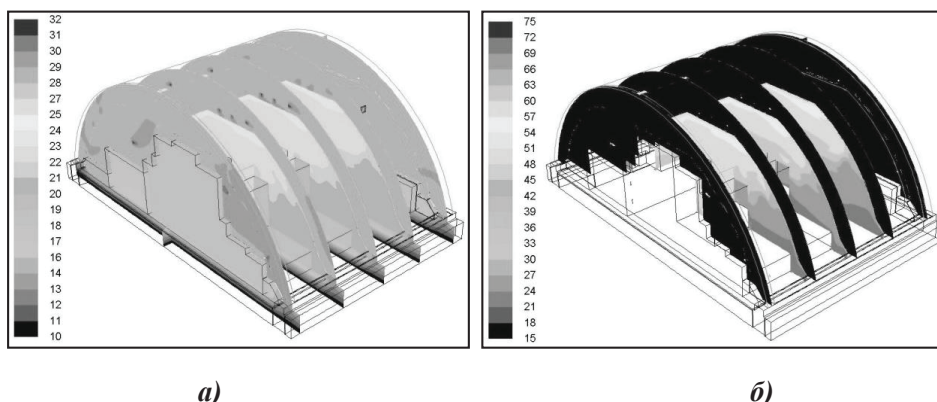


Рис. 3. Распределения температур (а) и влажности (б) в кольцевом и основном объемах ОК и НБК.

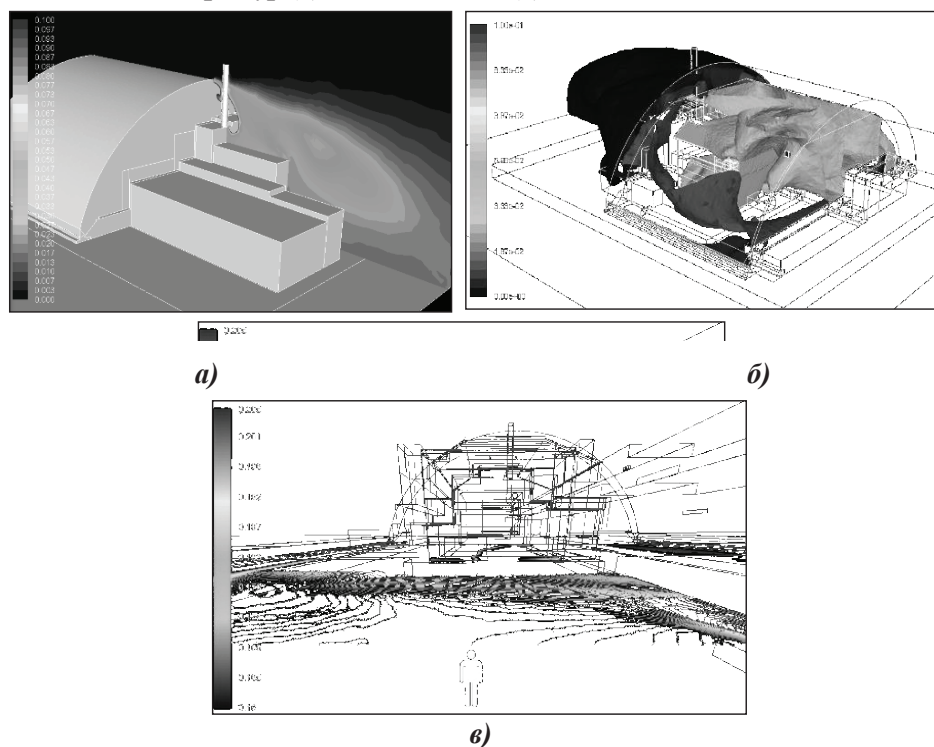


Рис. 4. Распределение концентрации РА, Бк/м³, исходящее из НБК в окружающую среду (а), изоповерхности концентраций РА внутри и снаружи НБК (б), а также изолинии концентраций РА внутри НСК на высоте 1,5 м от земли в зоне возможной деятельности персонала (в).

Выводы

1. Рассмотрены назначение и конструкция Нового Безопасного Конфайнмента (НБК), построенного и надвинутого на Объект «Укрытие» (ОУ) Чернобыльской

АЭС, который должен предотвратить утечки радиоактивных материалов из разрушенного реактора №4 в окружающую среду при его разборке.

2. Обосновывается необходимость анализа и про-

гнозирования совместных термогазодинамических и влажностных процессов в ОУ и НБК, которые определяют 100-летний ресурс НБК.

3. Для выполнения анализа и прогнозирования термогазодинамических и влажностных процессов в ОУ и НБК разработана трехмерная компьютерная CFD-модель, которая позволила проверить работоспособность системы вентиляции НБК при возможных климатических условиях. Проведенные исследования показали, что система вентиляции в целом работоспособна в диапазоне заданных климатических условий.

4. Показана возможность использования разрабо-

танной модели для анализа и прогнозирования распространения радиоактивных аэрозолей из разрушенного реактора и ОУ в объём НБК и далее в окружающую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Концептуальный проект* Нового Безопасного Конфайнмента, Чернобыльская Атомная Электростанция – Блок 4, Государственное Специализированное Предприятие “Чернобыльская Атомная Электростанция (ГСП ЧАЭС)”, Киевская обл., Украина, 2003 г.

ANALYSIS AND PREDICTION OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES AND RADIOACTIVE STATE OF THE NEW SAFE CONFINEMENT AND DESTROYED UNIT OF CNPP BASED ON CFD-MODELING

Krukovski P.G., Dr., Metel M.A., Polubinskiy A.S.

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine,
ul. Zhelyabova, 2a, Kiev-57, 03057, Ukraine

This paper deals with the purpose and design of the New Safe Confinement (NSC), which was built and slide over Object "Shelter" (OS) of the Chernobyl nuclear power plant. The justification of necessity analyzing and forecasting providing for joint termogazynamic and humidity processes in the OS and the NSC, which determine the 100-year lifetime for NSC. A 3D CFD-computer model was developed, which

allows also to analyze the radioactive aerosols propagation in the OS and NSC volumes as well as the environment on the base of above mentioned processes.

Ref. 1, fig. 4.

Key words: New Safe Confinement, heat and mass transfer, radioactive pollution, CFD-modeling.

1. *Kontseptual'nyy proyekt* Novogo Bezopasnogo Konfaynmenta, Chernobyl'skaya Atomnaya Elektrostantsiya – Blok 4 [Conceptual design of the New Safe Confinement, Chernobyl Nuclear Power Plant-Block 4], Gosudarstvennoye Spetsializirovannoye Predpriyatiye “Chernobyl'skaya Atomnaya Elektrostantsiya (GSP CHAES)” [State Specialized Enterprise "Chernobyl Atomic Power Station (SSE ChNPP)"], Kiyevskaya obl., Ukraina, 2003 g. (Rus)

Получено 11.04.2017

Received 11.04.2017

Шановні передплатники!

**20 квітня розпочинається передплата
на періодичні видання на 2 півріччя 2017 р.**

Оформити передплату на журнал «Промышленная теплотехника»
(підписний індекс журналу – 74405)
можна за «Каталогом видань України»:

- у відділеннях поштового зв'язку
- в операційних залах поштамтів
- в пунктах приймання передплати
- на сайті ДП «Преса» www.presa.ua

Рукописи статей до журналу слід подавати у повній відповідності до «Вимог»,
які розміщені на сайті www.ittf.kiev.ua у розділі – Журнал «Промышленная теплотехника».

Електронні адреси редакції –
shmorgun@nas.gov.ua; Martiuk@nas.gov.ua, shmorgun@ittf.kiev.ua.

