

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 38, № 2, 2016

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.

Шморгун В.В. – ответственный секретарь

### Редакционный совет:

Алексеев С.В. (Россия)

Вацлавик Ю. (Польша)

Коверда В.П. (Россия)

Коновалов В.И. (Россия)

Люриг Х. (Германия)

Маджамдар А. (Канада)

Матеи И. (Румыния)

Мизута И. (Япония)

Минг-Шан-Жу (Китай)

Нагоряков В.Е. (Россия)

Сайред Н. (Великобритания)

Тоттен Дж. Е. (США)

## АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Грищенко Т.Г., Круковский П.Г., Коваленко Г.В.,  
Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Метель М.А.,  
Полубинский А.С.

Работы Института технической теплофизики в  
решении проблем разрушенного реактора и  
строящегося конфайнмента (к 30-летию аварии  
на Чернобыльской АЭС).....5

## ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Авраменко А.А., Тыринов А.И., Дмитренко Н.П.,  
Кравчук А.В.

Влияние ионов примеси на количество  
водородных связей.....20

## ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

Басок Б.И., Гоцуленко В.В.

Теплофизическая модель автоколебаний в  
рекуперативных теплообменниках холодильников  
промышленных агрегатов.....26

Ободович А.Н., Фищенко А.Н., Сидоренко В.В.

Исследование абсорбции кислорода воздуха в  
ферментационном аппарате с дискретно-  
импульсным вводом энергии.....33

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА

Садовенко И.А., Инкин А.В.

Перспективы использования тепловой энергии  
водоносных горизонтов при подземном  
сжигании угля.....39

## ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Клименко В.М., Баштовий А.І., Зубенко В.І.  
Антощук Т.О.

Дослідження швидкого піролізу біомаси в  
абляційному шнековому реакторі.....48

Гелетуа Г.Г., Желєзна Т.А., Баштовий А.І.

Аналіз енергетичних стратегій країн ЄС та світу і ролі  
в них відновлюваних джерел енергії. Частина 1.....56

Кравченко І.П.

Геотермальна електрогенерація в умовах  
низькопотенційної геосистеми території України.....65

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Карпенко Д.С., Дубровская В.В., Шкляр В.И.

Анализ эффективности фотоэлектрических систем  
коммунального назначения.....76

**ИЗМЕРЕНИЕ, КОНТРОЛЬ. АВТОМАТИЗАЦИЯ  
ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

---

**Маліновський А.А., Турковський В.Г., Музичак А.З.**

Розвиток методів аналізу й удосконалення режимів  
систем комунальної теплоенергетики.....81

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE  
INSTITUTE OF ENGINEERING  
THERMOPHYSICS

## INDUSTRIAL HEAT ENGINEERING

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND  
APPLIED JOURNAL

Published bimonthly  
Founded in 1979

**Volume 38, № 2, 2016**

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

## CONTENTS

---

### NUCLEAR POWER

---

**T.G. Grishchenko, P.G. Krukovskyi, G.V. Kovalenko,  
LV. Dekusha, L.I. Vorobiev, M.A. Metel, A.S. Polubinsky**

Works of the Institute of engineering thermophysics  
on the solution to the problems of the destroyed reactor  
and new confinement (to the 30th anniversary of the  
Chernobyl accident).....5

---

### HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES

---

**A.A. Avramenko, A.I. Tyrinon, N.P. Dmitrenko,  
A.V. Kravchuk**

The influence of impurities on the number of  
hydrogen bonds.....20

---

### HEAT AND MASS EXCHANGE APPARATUS

---

**B.I. Basok, V.V. Gotsulenکو**

Thermophysical model of self-oscillations in a recuperative  
heat exchanger refrigerator industrial aggregates.....26

**A. Obodovich, A. Fischenko, V. Sidorenko**

Research of air oxygen absorbtion in the fermentation  
apparatus with discrete-pulse input of energy.....33

---

### FUEL UTILIZATION AND BURNING

---

**I.A. Sadovenko, A.V. Inkin**

Prospects of use of thermal energy in aquifers  
underground burning of coal.....39

---

### RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

---

**V.M. Klimenko, A.I. Bashtovyi, V.I. Zubenکو,  
T.O. Antoshchuk**

Research of biomass fast pyrolysis in the ablative  
screw reactor.....48

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

Analysis of energy strategies of EU and world countries  
and the role of renewables in the strategies. Part 1.....56

**I.P. Kravchenko**

Geothermal electric generation in low-grade conditions  
potential of geosystem of Ukraine.....65

---

### ENERGY SAVING

---

**D.S. Karpenko, V.V. Dubrovskaya, V.I. Shklyar**

Analysis of efficiency photovoltaic systems  
municipal purpose.....76

**MEASUREMENT, CONTROL, AUTOMATION OF  
THERMAL PROCESS**

---

**A.A. Malinovskyi, V.H. Turkovskyi, A.Z. Muzychak**

Development methods of analysis and improvement of  
regimes of municipal heating systems.....81

УДК 536.242:532.242

**РАБОТЫ ИНСТИТУТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ  
В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ РАЗРУШЕННОГО РЕАКТОРА  
И СТРОЯЩЕГОСЯ КОНФАЙНМЕНТА  
(К 30-ЛЕТИЮ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС)**

**Грищенко Т.Г., д.т.н., Крукровский П.Г., д.т.н., Коваленко Г.В., к.т.н.,  
Декуша Л.В., к.т.н., Воробьев Л.И., к.т.н., Метель М.А., к.т.н., Полубинский А.С.**

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

Зроблено огляд робіт, що виконувались співробітниками ІТТФ НАН України для ліквідації наслідків аварії на 4-му блоці Чорнобильської АЕС 26 квітня 1986 р. Так для виявлення і дослідження місць скупчення ядерного палива і паливовмісних мас були розроблені і виготовлені перетворювачі теплового потоку і температури. Виконувалася розрахункова робота з прогнозування можливого розігріву зруйнованого реактора внаслідок заповнення його різними матеріалами (бетоном, керамзитом і обрізками сталевих труб). Побудовано комп'ютерні моделі і коротко представлені результати аналізу і прогнозування термогазодинамічних процесів в Новому Безпечному Конфайнменті та «Об'єкті Укриття» Чорнобильської АЕС з метою перевірки підтримання заданих параметрів і працездатності ряду інженерних систем.

Представлен обзор работ, выполненных сотрудниками Института технической теплофизики НАН Украины для ликвидации последствий аварии на 4-м блоке Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г. Так для выявления и исследования мест скопления ядерного топлива и топливосодержащих масс были разработаны и изготовлены преобразователи теплового потока и температуры. Выполнялась расчетная работа по прогнозированию возможного разогрева разрушенного реактора вследствие заполнения его различными материалами (бетоном, керамзитом и обрезками стальных труб). Построены компьютерные модели и кратко представлены результаты анализа и прогнозирования термогазодинамических процессов в Новом Безопасном Конфайнменте и «Объекте Укрытие» Чернобыльской АЭС с целью проверки поддержания заданных параметров и работоспособности ряда инженерных систем.

An activities review of employees of IETP of NAS of Ukraine on the mitigation of the implications of the accident at Unit 4 of the Chernobyl nuclear power plant, April 26, 1986 is shown. To identify and study nuclear fuel and fuel-containing material accumulation places heat flow and temperature transducers have been developed and manufactured. The work on the forecasting of probable warming up of the destroyed reactor due to being filled with various materials (concrete, expanded clay and scraps of steel pipes) was performed. Computer models were developed and the results of the analysis and forecasting of heat and gas dynamic processes are presented for the New Safe Confinement and "Object Shelter" of the Chernobyl nuclear power plant in order to verify the fitting to defined criteria of engineering systems performance.

Рис. 15.

**Ключевые слова:** авария на Чернобыльской АЭС, теплотехнические измерения, преобразователи теплового потока и температуры, моделирование теплового состояния, конфайнмент.

В ночь на 26 апреля 1986 г. на 4-м блоке ЧАЭС произошла крупнейшая из аварий, которые знала атомная энергетика. В результате взрыва была полностью разрушена активная зона и вся верхняя часть здания реактора, сильно пострадали и другие части блока (рис. 1).

Были уничтожены барьеры и системы безопасности, защищавшие окружающую среду от радионуклидов, наработанных в облученном топливе. Выброс активности из поврежденного реактора на уровне миллионов кюри в сутки продолжался в течение 10 дней с 26.04.86 по 06.05.86, после чего резко упал (в тысячи раз) и в дальнейшем продолжал уменьшаться.

Авария на ЧАЭС так или иначе затронула жизнь миллионов людей. Сотни тысяч из них были эвакуированы с загрязненных территорий Украины, России, Белоруссии. Другие сотни тысяч

непосредственно участвовали в создании «Объекта Укрытия» (ОУ) над разрушенным 4-м блоком, в дезактивации площадки ЧАЭС и других блоков, в работах в чернобыльской зоне отчуждения и временного отселения, в строительстве города Славутич и т.п.



*Рис. 1. Разрушенный 4-ый блок ЧАЭС (май 1986 г.).*

Сразу после аварии и за прошедшие 30 лет инженерами, рабочими и научными сотрудниками украинских и зарубежных организаций был выполнен огромный объем работ по изучению и анализу состояния ОУ, стабилизации его конструкций, а также проектированию и строительству дополнительных сооружений для ликвидации последствий аварии.

В статье кратко изложены работы, выполненные и выполняющиеся на протяжении 30 лет сотрудниками Института технической теплофизики НАН Украины (ИТТФ), для решения перечисленных выше задач.

### 1. ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗРУШЕННОГО РЕАКТОРА



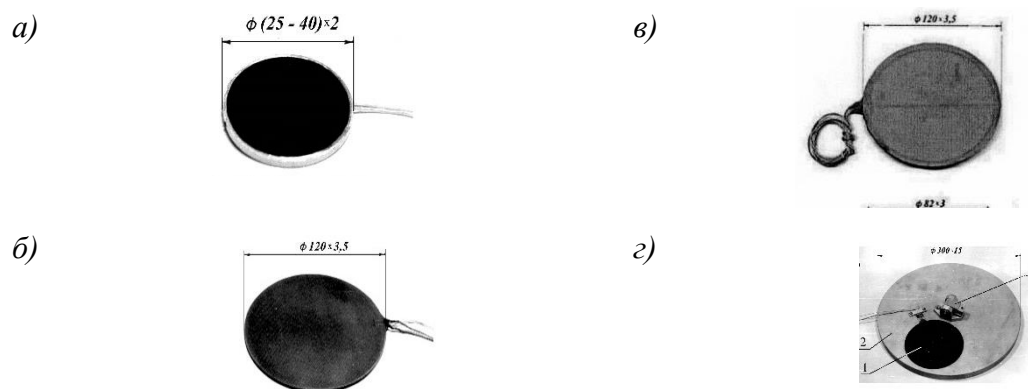
Непосредственно в зоне аварии сотрудники института начали работать 10 мая 1986 г. В этот день по приглашению академика АН СССР Б.П. Велихова в г. Чернобыль прибыл чл.-кор. АН УССР О.А. Геращенко (см. фото) для обсуждения вопросов организации постоянных измерений температуры и теплового потока на развале четвертого блока ЧАЭС. Главная задача после 26 апреля 1986 г. состояла в том, чтобы не допустить повторения аварийного выброса радиоактивных веществ. Для этого необходимо было обследовать состояние разрушенного четвертого блока и выявить потенциально опасные скопления ядерного топлива в условиях высокого уровня радиации в помещениях блока и на промплощадке. Обломки тепловыделяющих элементов и топливосодержащие массы (ТСМ), выкинутые в результате взрыва из шахты реактора и разбросанные по всей территории промплощадки, являлись локальными источниками радиоактивного излучения очень высокой интенсивности. Особенно много их находилось в центральном машинном зале и на крышах машзала и соседнего третьего блока.

Для диагностики энергетического состояния огромной зоны объемом  $105 \text{ м}^3$ , а затем для выявления и исследования мест скопления ядерного топлива и ТСМ на ЧАЭС, а позже на объекте «Укрытие» среди различных практически испытанных методов с наибольшей эффективностью

проявил себя теплотрический метод. Этот метод предусматривал применение первичных измерительных преобразователей теплового потока (ПТП) и температуры (ПТ) для определения аномальных тепловых источников и характера их пространственного распределения, что позволило оперативно оценить места скопления ТСМ и уточнить количество ядерного топлива, оставшегося в объекте.

Начиная с 10 мая 1986 г. в ИТТФ непрерывно (почти круглосуточно) выполнялась разработка и изготавливались ПТП и другие необходимые средства измерительной техники. С их применением регулярные измерения стали проводить с июня, когда по результатам дозиметрической и визуальной разведок были составлены атласы радиоактивной обстановки во всех доступных помещениях аварийного блока и выявлены сравнительно безопасные подходы к наиболее важным узлам разрушенного реактора и местам ожидаемого размещения выброшенного ядерного топлива.

ПТП, будучи наклеенными в нескольких местах на стены барботера, дали первую объективную информацию о тепловой стороне протекавших процессов. Сколь актуально было получение этой информации, можно судить на примере развития ошибочной гипотезы, родившейся в первые дни после аварии и сводившейся к тому, что в центральной части разрушенного реактора возник плазменный сгусток с температурой 15000 К, который мог проплавить несколько одно- и двухметровых перекрытий и провалиться в грунт под основание реактора. Главная опасность усматривалась в том, что дальнейшее его непредсказуемое движение при непредсказуемой мощности будет невозможно остановить. Для ограничения этой угрозы было принято решение о сооружении под реактором водоохлаждаемой железобетонной плиты. Только после завершения этого строительства вспомнили о том, что при температуре 15000 К плотность плазмы на порядок меньше плотности воздуха, и сгусток плазмы, если бы он существовал, всплыл бы, а не погружался. Выполненные измерения позволили установить истинные максимальные значения теплового потока и температуры, которые оказались на два порядка ниже предполагаемых. Таким образом, в каком-то переносном смысле созданный буйной фантазией теоретиков сгусток плазмы был остановлен не колоссальной водоохлаждаемой железобетонной плитой, а несколькими ПТП.



**Рис. 2. Модели ПТП, использованные при диагностике теплового состояния 4-го энергоблока ЧАЭС: а – ПТП – 0.11.13.14.00; б – ПТП – 0.11.14.21; в, г – ПТП-0.11.33.14.21.**

Сразу же после определения доступных помещений и путей к ним, способов и средств доставки измерительных элементов в зону, прилегающую к шахте реактора, были начаты работы по созданию системы оперативной диагностики и контроля физических параметров, обуславливающих тепловое и радиоактивное состояние разрушенного реактора. К этому сроку (конец мая – начало июня 1986 г.) в отделе теплотрии ИТТФ было уже разработано и изготовлено несколько моделей ПТП, показанные на рисунке 2. Несмотря на то, что уже имелся опыт разработки и изготовления различных ПТП и приборов на их основе, которые широко применялись во многих отраслях науки и техники, для экстремальных условий на ЧАЭС пришлось решать абсолютно новые задачи.

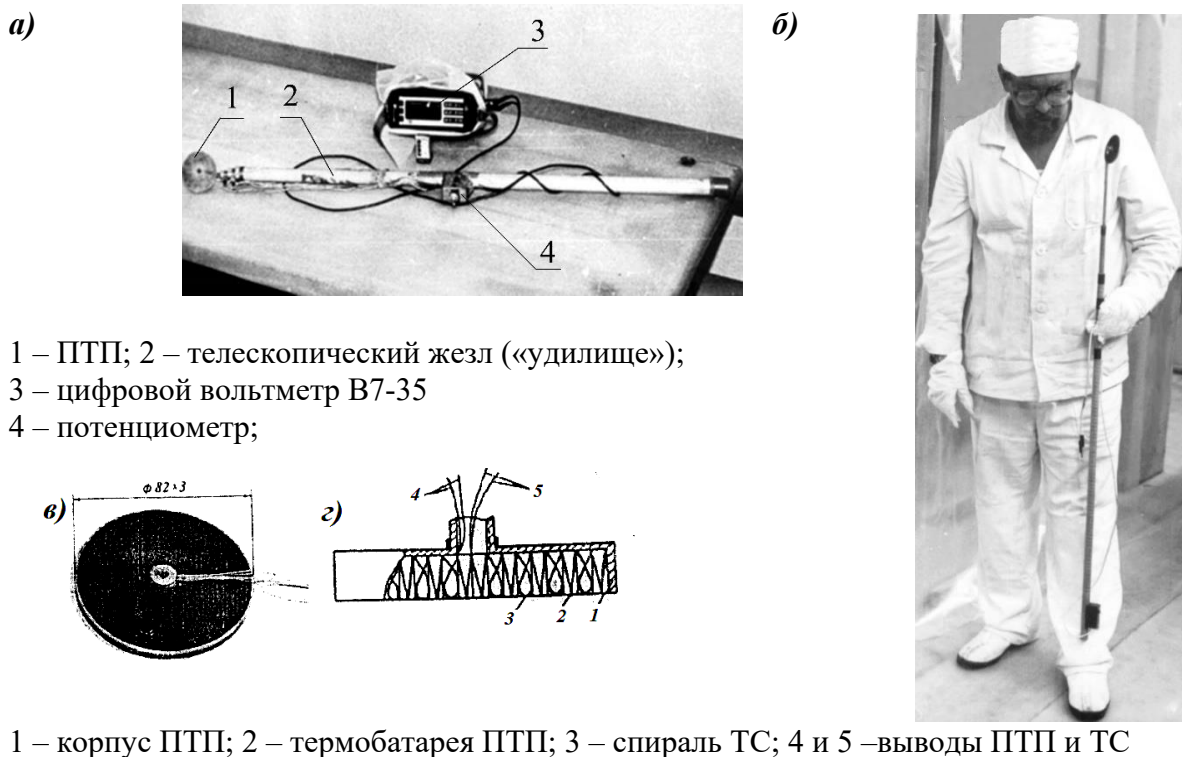
Так ПТП, расположенные в зоне реактора, оказались на расстоянии до 1000 м от регистрирующей аппаратуры, на которую сигналы поступали по кабельной связи. Это потребовало создания ПТП не только с мощными выходными сигналами, но и способными длительное время сохранять стабильной свою чувствительность.

Доставку ПТП к месту их установки на стены разрушенных ограждающих конструкций и сохранившихся помещений выполняли добровольцы – «бойцы», а также средствами робототехники и вертолетом, но при этом установка ПТП на поверхности развала носила уже случайный характер. ПТП, предназначенные для доставки посредством вертолета, приклеивали к толстому металлическому диску. Такие ПТП с присоединенным кабелем связи опускали на фале с вертолета на запланированный участок развала, а второй конец кабеля, оформленный разъемом, сбрасывали в зоне, в которой был возможен доступ добровольца-бойца.

Для мониторинга понадобилось свыше 300 шт. ПТП различных моделей с разными техническими характеристиками. Их непрерывно изготавливали, отправляли на ЧАЭС и там устанавливали на объектах в зоне разрушенного энергоблока.

Поскольку размещение ПТП, доставляемых на развал энергоблока с помощью вертолета или крана «DEMAg», имело исключительно случайный характер, был разработан переносной прибор, позволявший оператору, находящемуся в относительно безопасной зоне, измерять одновременно плотность теплового потока и температуру, – прибор модели ИТП-Т, внешний вид которого показан на рис. 3.

Для упрощения обработки показаний вольтметра и получения измеряемой плотности теплового потока в условиях жесткого лимита времени применен встроенный в рукоятку жезла потенциометр,



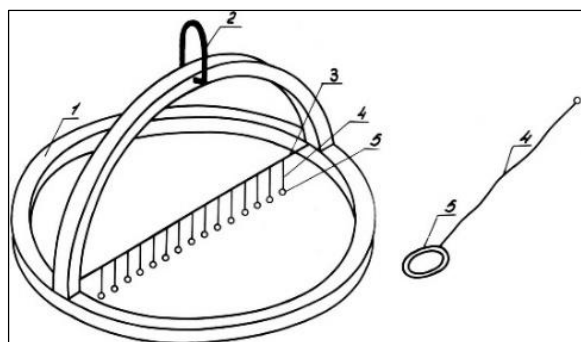
**Рис. 3. а – Внешний вид переносного прибора для измерения теплового потока и температуры на поверхности разрушенного энергоблока ЧАЭС модели ИТП-Т; б – сотрудник ИТТФ П.П. Бойко с «удилищем» переносного прибора ИТП-Т; в – ПТП в металлическом профилированном диске; г – схема конструкции ПТП.**

с помощью которого за счет некоторой потери чувствительности коэффициент преобразования был выведен на такое значение, которое позволило быстро фиксировать искомую плотность потока по показанию вольтметра в милливольтках умножением на 10.

Использование стеклопластикового удилища с возможностью удлинения до 4 м позволило оператору находиться на относительно безопасном расстоянии от объекта в условиях сильного ионизирующего излучения. Постоянные времени термобатареи и ТС на уровне соответственно, 25 с и 40 с позволили уменьшить время пребывания оператора в каждой точке замеров до 1,5...2 мин. Было изготовлено и передано Комплексной экспедиции "Укрытие" четыре таких прибора. С их помощью получено громадное количество экспериментальной информации о тепловых проявлениях на многих участках разрушенного энергоблока.

В условиях пораженной зоны развала четвертого блока ЧАЭС оказалось затруднительным непосредственное использование имеющейся теплотермометрической аппаратуры из-за большой радиационной опасности, так как доза ионизирующего излучения превышала несколько тысяч рентген в час. Для решения задачи температурного контроля поверхности развала был создан специальный термометрический буй (термозонд). В качестве термометрического явления была выбрана зависимость температуры плавления проволоки сплавов от их состава и массовой доли компонентов.

Термозонд (рис. 4) состоял из алюминиевого каркаса, на котором закреплены серьга под вертолетный фал и тросик, несущий подвешенные на поводках восемнадцать плавких колечек.



**Рис. 4. Термозонд для определения температуры поверхности 4-го блока ЧАЭС: 1 – алюминиевый каркас; 2 – серьга под вертолетный фал; 3 – трос крепежный; 4 – поводки; 5 – плавкие кольца.**

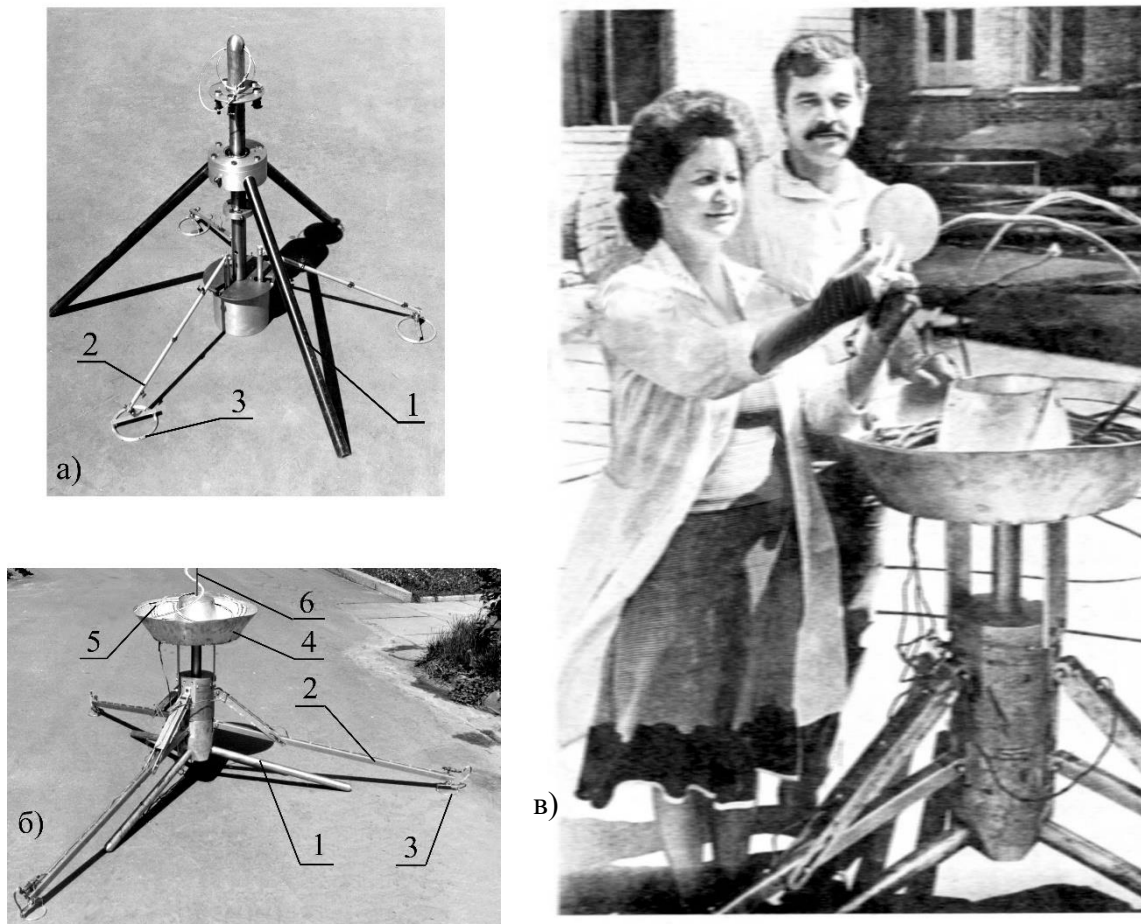
Колечки, выполненные из сплавов разного состава, обеспечивали индикацию температуры в диапазоне от 30°C до 300°C. Измеренная температура в контролируемой точке равнялась температуре из интервала между значениями температуры последнего расплавленного и первого сохранившегося колец, определяемых при осмотре после извлечения термозонда.

В пораженной зоне развала четвертого блока ЧАЭС оказалось весьма затруднительным наземное непосредственное применение теплотермометрической аппаратуры из-за большой радиационной опасности. Для первичной диагностики состояния разрушенного блока в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (ИАЭ) и ИТТФ АН УССР были созданы специальные измерительно-диагностические буй, доставку которых на объект осуществляли вертолетом и краном «DEMAG».

В ИТТФ было создано две модели и изготовлено по одному экземпляру буюв. Наиболее совершенной явилась вторая модель (рис. 5). Буй представлял собой шарнирную конструкцию, выполненную из алюминиевого сплава с тремя разнесенными под углом 120° опорами (1) штангами (2) которые были держателями ПТП (3). Буй был снабжен фланцем (4) типа «сомбреро» внутрь которого кольцами укладывали измерительный кабель длиной 100 м, а также серьгой для крепления к транспортному фалу.

Оба экземпляра были доставлены в Чернобыль, однако наиболее массовыми буюми, конструкция которых учитывала особенности установки на развал с помощью вертолетов, были диагностические буй ИАЭ. Они оказались более универсальными, так как содержали около двадцати первичных преобразователей различных физических величин, в том числе ПТП и ПТ, созданные в ИТТФ, то есть 20 % всех измерительных каналов были отданы преобразователям ИТТФ.

Буй ИАЭ представлял собой металлическую конструкцию в виде полого усеченного

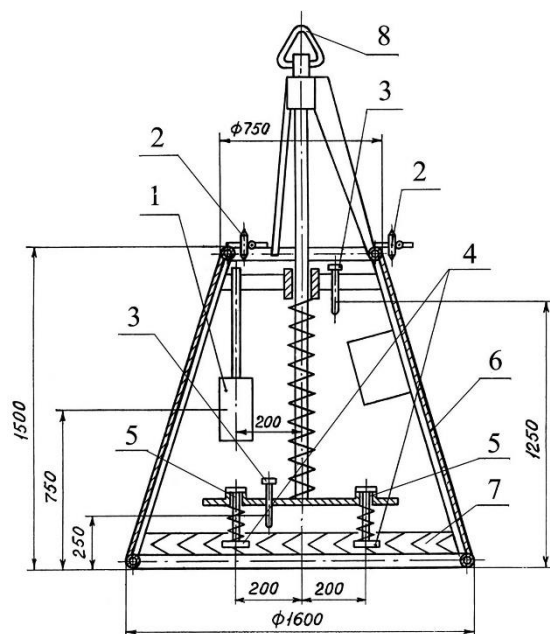


**Рис. 5. а – первая модель диагностического буя ИТТФ;  
б – вторая модель диагностического буя ИТТФ;  
в – сотрудники ИТТФ зав. НИИ группой В.В. Василевская, главный конструктор  
проекта В. Нелина – участники разработки диагностических буй.  
1 – опоры; 2 – штанги-держатели ПТП; 3 – ПТП в кольце; 4 – фланец «сомбреро»;  
5 – кабель; 6 – стальная проволока.**

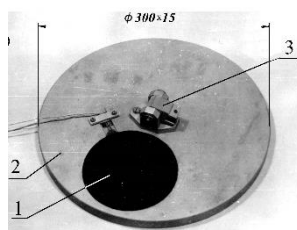
конуса (рис. 6).

Многие из различных преобразователей буйев при транспортировании, а также в тяжелых температурных и радиационных условиях разрушенного реактора, выходили из строя еще на этапе установки. ПТП и ТП ИТТФ, как правило, работали безотказно. Всего было доставлено на поверхность реактора 15 действующих буйев, с помощью которых на поверхности засыпки реактора было установлено около 150 действующих преобразователей различных физических величин, включая ПТП и ТП ИТТФ. В течение 1986–1987 годов сотрудниками ИТТФ в аварийном режиме был разработан, изготовлен и поставлен на ЧАЭС комплекс специальной теплотермометрической аппаратуры для выполнения оперативного обследования разрушенного энергоблока. В результате в короткий срок была создана оперативная система контроля и диагностики тепловых параметров состояния разрушенного энергоблока. Примененная аппаратура позволила составить полную общую теплоточную и температурную картины аварийной зоны. Наиболее существенные результаты, полученные с ее помощью, состоят в следующем:

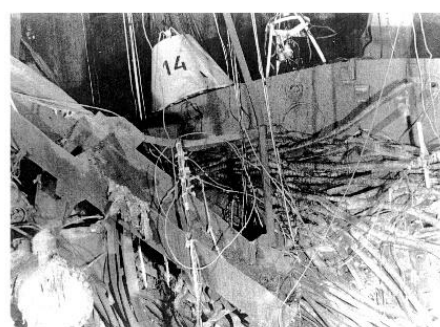
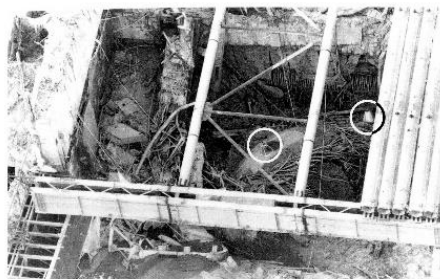
– мониторинг состояния разрушенного реактора позволил предсказать последующее развитие изменений теплового состояния во времени;



а)



б)



в)

**Рис. 6. а – конструктивная схема диагностического буя ИАЭ АН СССР:**

**1 – подпружиненный стержень, который несет ПТП; 2 – термометры сопротивления медные; 3 – ионизационная гамма-камера; 4 – термоанемометры; 5 – кольцо под вертолетный фал; 6 – ПТП с никелевым термометром сопротивления; 7 – кожух; основа из свинцовых слитков; б – ПТП-0.11.33.14.21; в – диагностические буи ИАЭ СССР в актуальных точках разрушенного энергоблока.**

– количественная оценка теплового баланса реактора №4 позволила установить, что количество оставшегося в реакторной зоне ядерного топлива превышает 87 % от топливной загрузки реактора на момент аварии;

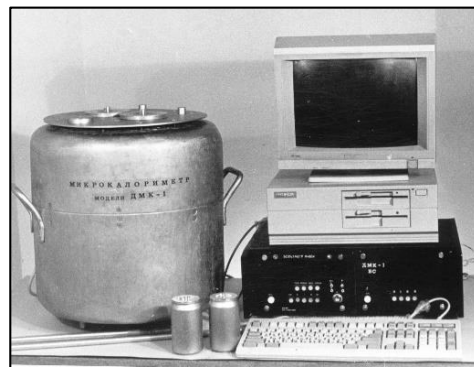
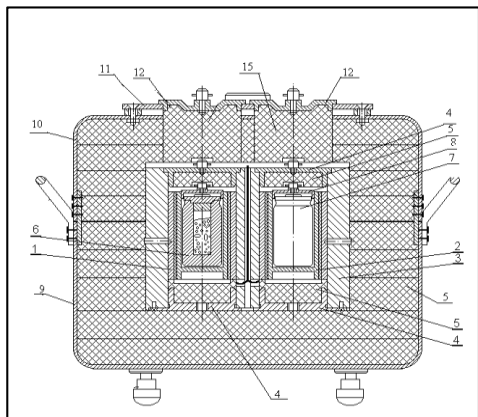
– детальное теплотрирование прилегающих к шахте реактора помещений и ограждающих строительных конструкций самой шахты позволило, с одной стороны, оптимизировать размещение первичных преобразователей оперативного контроля и, с другой стороны, показало наличие участков с повышенными плотностью теплового потока и температуры, тем самым помогло определить актуальные направления дальнейших диагностических исследований.

Активная работа по созданию средств измерения на объектах разрушенного энергоблока продолжалась несколько лет. В это время был проведен поиск по созданию новых моделей ПТП, отличающихся большей коррозионной стойкостью за счет двухслойных гальванических покрытий

термоэлементов ПТП и стабильностью их эксплуатационных и метрологических характеристик. Кроме того, спустя почти 10 лет по заданию МНТЦ «Укрытие» в 1995–96 г.г. был разработан специальный микрокалориметр модели ДМК-1 для измерения остаточного тепловыделения в образцах ТСМ.

С начала систематических исследований аварийного энергоблока ЧАЭС (июнь 1986 г.) было установлено, что ядерное топливо находится в основном в составе застывших лавообразных скоплений, сосредоточенных в шахте реактора и прилегающих к ней подреакторных помещениях. Встречаются также пемзообразные ТСМ, удельный вес которых менее  $1 \text{ г/см}^3$ , и шлакообразные ТСМ, занимающие промежуточное положение между первыми и вторыми по удельному весу. В исследованных образцах топливо находится в виде мелкодисперсных частиц, вкрапленных в силикатную матрицу. Количество топлива в различных образцах ТСМ неодинаково, в отдельных образцах достигает 60 % массы при среднем содержании около 10 %. Тепловой эффект ТСМ определяется распадом долгоживущих радионуклидов и составляет по оценочным расчетам, в среднем, порядка 3 Вт на 1 т ТСМ, при условии, что все виды радиационного излучения поглощаются в образце. Экспериментальное определение столь малых значений мощности тепловыделения ТСМ представляет собой сложную техническую задачу, требующую применения высокочувствительного инструмента для измерения теплового потока в предполагаемом диапазоне значений ( $10^{-4} \dots 1$ ) Вт. Эта задача осложнена также тем, что исследуемые образцы ТСМ радиоактивны и мощность дозы гамма-излучения, как правило, составляет десятки бэр/ч.

Успехи в развитии теплотрии в Украине и опыт применения ПТП при исследовании тепловых процессов и эффектов в условиях повышенной радиации позволили разработать новое средство измерения мощности тепловыделения ТСМ-микрокалориметр модели ДМК-1, внешний вид и схема конструкции теплового блока предоставлены на рисунке 7.



**Рис. 7. Микрокалориметр ДМК-1: 1,2 – ячейки рабочая и сравнения; 3 – калориметрический блок; 4 – нижние и верхние крышки гнезд; 5 – вкладыши теплоизоляционные; 6, 7 – контейнеры; 8 – крышки измерительных ячеек; 9, 10 – корпус, крышка корпуса; 11 – панель установочная, 12 – крышка.**

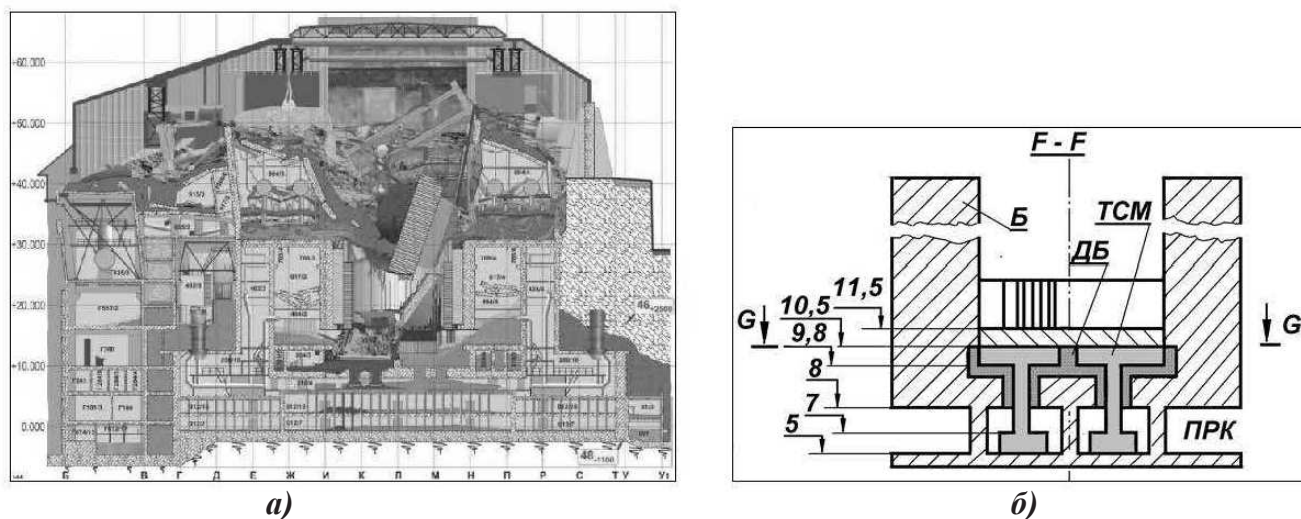
Для обеспечения высокой чувствительности и необходимой точности измерения теплового эффекта в диапазоне значений ( $10^{-4} \dots 1$ ) Вт в микрокалориметре используется дифференциальный метод измерения, с применением термоэлектрических ПТП вида цилиндрической вспомогательной стенки. По результатам государственной метрологической аттестации установлено, что предельно допускаемая относительная погрешность измерения мощности тепловыделения в диапазоне ( $10^{-3} \dots 2$ ) Вт составляет  $\pm 1,5 \%$ , а в диапазоне ( $10^{-5} \dots 10^{-3}$ ) Вт не хуже  $\pm 5,5 \%$  при однократном

измерений и  $\pm 2$  % при многократных измерениях. Таким образом, на момент создания, микрокалориметр может быть отнесен к уникальным средствам измерения с учетом объема измерительной ячейки и достигнутой чувствительности к измеряемому параметру. С использованием микрокалориметра ДМК-1 был исследован большой объем веществ и образцов ТСМ.

Таким образом, специалисты ИТТФ внесли существенный вклад в решение проблемы термометрирования разрушенного блока ЧАЭС.

## 2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ «ОБЪЕКТА УКРЫТИЕ»

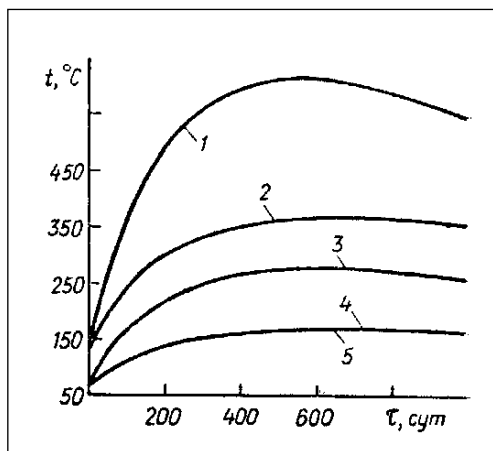
В 1988-89 годах руководство ЧАЭС волновал вопрос теплового состояния активной массы разрушенного блока ЧАЭС. Главным из них был вопрос выделения теплоты остатками активной массы и в этой связи прогноз температуры разрушенного реактора. При ликвидации аварии в 1986 году в разрушенную часть блока вертолетами сверху были набросаны десятки тонн различных веществ для снижения радиоактивных выбросов и замедления реакции топлива, что также влияло на температуру остатков топлива. Было построено укрытие блока (рис. 8, а) и рассматривался также вопрос об усилении изоляции разрушенной части реакторного блока ЧАЭС от окружающей среды. В частности, рассматривались варианты заливки бетоном пространства под перевернутой крышкой реактора. Бетон хорошо бы изолировал разрушенную часть реакторного блока, но существенно препятствовал бы охлаждению остатков активной массы. Поэтому рассматривался также вариант засыпки этого пространства керамзитом и обрезками стальных труб, что сохраняло бы возможность охлаждения активной массы.



**Рис. 8. Рисунок разрушенного 4-го энергоблока ЧАЭС (а) и схема модели с топливосодержащими массами в подреакторном пространстве (б).**

В этой связи руководство ЧАЭС обратилось к ученым ряда научных центров страны, в частности к ИТТФ, с просьбой рассчитать и спрогнозировать тепловой режим разрушенного реактора в существующем состоянии и для различных вариантов засыпки пространства под сдвинутой крышкой реактора. ИТТФ принял активное участие в этой работе, выполнил ее, и два представителя института П.Г.Круковский и Г.В.Коваленко весной 1989 г. выезжали в г. Чернобыль для сдачи работы и обсуждения ее результатов на специальном совещании. На совещании присутствовали представители других научных центров страны, в частности, Института тепломассообмена, г. Минск, Московского авиационного института, которым также была поручена эта работа. Представители институтов сравнивали свои результаты, проходило их обсуждение.

Для образовавшейся композиции при измеренном и предполагаемых тепловыделениях решалось уравнение теплопроводности при известных начальных и граничных условиях. Как и предполагалось, наибольшая температура наблюдалась на оси юго-восточного клапана. При суммарном тепловыделении 22,3 кВт и свободном доступе воздуха в подреакторное пространство максимум температуры составил бы не более 220 °С, при полной теплоизоляции боковой поверхности трубы клапана – 315 °С.



**Рис. 9. Изменения во времени максимальной температуры тепловыделяющих масс;**

- 1, 3 – после засыпки керамзитом;  
2, 4 – бетоном; 5 – обрезками труб;  
(1, 2 – труба клапана теплоизолирована).  
3, 4, 5 – свободный доступ воздуха в ПРК.**

Расчет температур (рис. 9) композиций производился для сравнения трех вариантов укрепления шахты реактора. Первый вариант – заливка шахты бетоном; второй – засыпка шахты керамзитом; третий – засыпка свободного пространства шахты обрезками труб диаметром 0,1 м. Наихудшим вариантом оказался случай засыпки шахты мало теплопроводным керамзитом. Через 600 суток при сохранении конвекции воздуха в ПРК температура достигнет 280 °С, а при полной теплоизоляции трубы клапана – 400 °С, что недопустимо с точки зрения прочности бетона. Варианты – заливка шахты бетоном и засыпка шахты обрезками труб показали похожие результаты. Максимумы температур достигались по истечении 700 суток и составляли соответственно 160 °С и 356 °С в зависимости от сохранения или отсутствия конвекции в ПРК.

Общим, совпадающим у всех исполнителей этой работы, был вывод о том, что возможна ситуация, когда остатки активной массы в реакторе не достигнут опасного разогрева, а рассмотренные варианты засыпки пространства под нарушенной крышкой ре-

актора будут в той или иной мере влиять на уровень и темп охлаждения реактора.

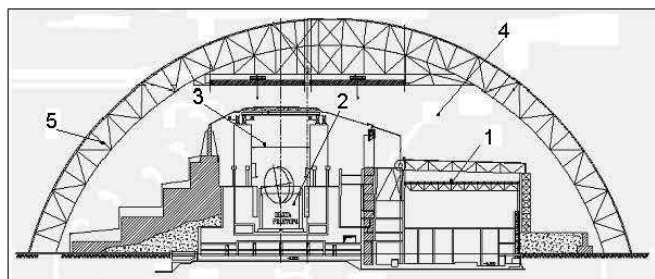
Таким образом, специалисты ИТТФ в области моделирования процессов теплообмена внесли еще один вклад в решение проблем разрушенного блока ЧАЭС.

### **3. АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НОВОМ БЕЗОПАСНОМ КОНФАЙНМЕНТЕ И «ОБЪЕКТЕ УКРЫТИЕ» ЧАЭС**

После этого в ИТТФ в отделе моделирования процессов тепломассообмена (руководитель П.Г.Круковский) продолжались и продолжаются работы по решению и других проблем разрушенного блока и строящегося так называемого Нового Безопасного Конфайнмента (НБК), который является защитным сооружением, включающим в себя комплекс технологического оборудования для извлечения из разрушенного четвертого энергоблока Чернобыльской АЭС материалов, содержащих ядерное топливо и обращения с радиоактивными отходами, а также другие системы, предназначенные для осуществления деятельности по преобразованию этого энергоблока в экологически безопасную систему и обеспечение 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 будет установлено большинство систем жизнеобеспечения и контроля, и вспомогательного здания, в котором будут находиться другие системы.

Для обеспечения защиты окружающей среды и гарантирования долговременного сопротивления коррозии, структурная часть Арки (рис. 10, позиция 1) внутри и снаружи будет обшита двумя металлическими оболочками, – внешней 2 и внутренней 3.



**Рис. 10. Схема Объекта «Укрытие» и Нового Безопасного Конфайнмента в поперечном сечении (а) и фото частично собранного НБК (октябрь 2014 г.)**  
(б: 1 – машзал, 2 – разрушенный реактор, 3 – Объект «Укрытие», 4 – основной объем НБК, 5 – стальные конструкции и кольцевое пространство Арки НБК.

В кольцевом пространстве и основном объеме предусматриваются системы вентиляции, которые должны обеспечить требуемый режим влажности (с целью снижения до минимума коррозии металлических конструкций кольцевого пространства) и предотвратить попадание аэрозольных выбросов в окружающую среду, которые могут внезапно возникнуть в основном объеме Арки при демонтаже конструкций ОУ.

Новый Безопасный Конфайнмент спроектирован и строится консорциумом VINCI Construction Grands Projets / Bouygues Travaux Publics NOVARKA (НОВАРКА) и будет закончен в 2017 году. Он 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. Общий вес Арки составляет около 33 тыс. тонн.

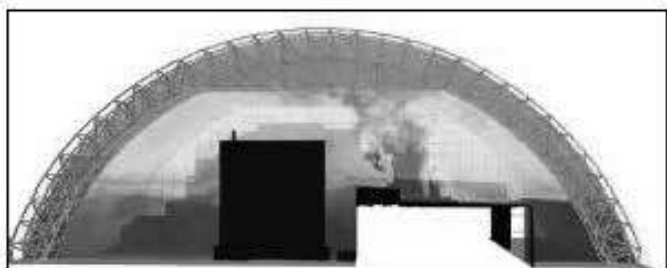
Ниже будут описаны модели и результаты анализа и прогнозирования термогазодинамических процессов в НБК и ОУ, которые непосредственно влияют на безопасность, работоспособность и ресурс самого НБК.

Одной из таких задач была задача пожарной безопасности НБК. Интересные и важные из них были выполнены в 2005 и 2010 г. и были связаны с оценкой огнестойкости (время до начала обрушения из-за перегрева) несущих конструкций арочного свода Нового Безопасного Конфайнмента (НБК) при выгорании горючей части покрытия крыши машзала 4-го блока ЧАЭС (рис. 11). Информация о назначении и конструкции НБК приводится в следующем разделе.

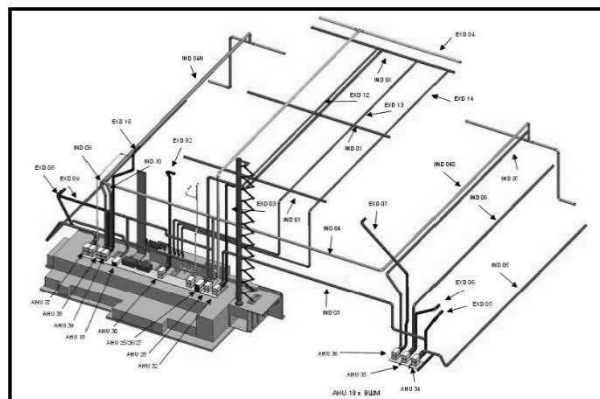
Сотрудники отдела выступали как в качестве исполнителей этой работы, так и в качестве экспертов при совместной работе с французской фирмой «Эффектис».

Следующей задачей была задача анализа работоспособности и устойчивости при авариях одной из важных инженерных систем НБК – системы вентиляции (рис. 11), 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 ( $\approx -5$  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 пространстве, для обеспечения 100-летнего ресурса Арки НБК. Для проверки проекта и анализа работы системы вентиляции НБК в различных метеорологических условиях и в условиях отказов консорциум НОВАРКА в 2010 г. объявил тендер на выполнение таких работ с помощью моделирования. ИТТФ выиграл этот тендер и отдел моделирования процессов теплообмена в течение 2,5 лет выполнял эту работу. Работа выполнялась с помощью созданной сложной трехмерной модели, описывающей теплогазодинамические и влажностные процессы в НБК и ОУ с учетом всех систем вентиляции и осушения воздуха.



**Рис. 11. Поле температур в объёме НБК при пожаре на крыше маизала.**

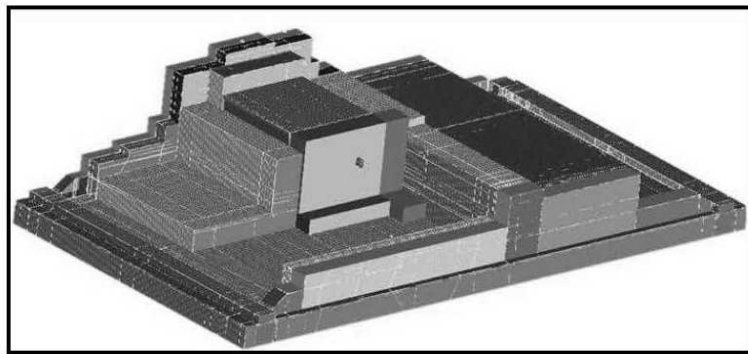
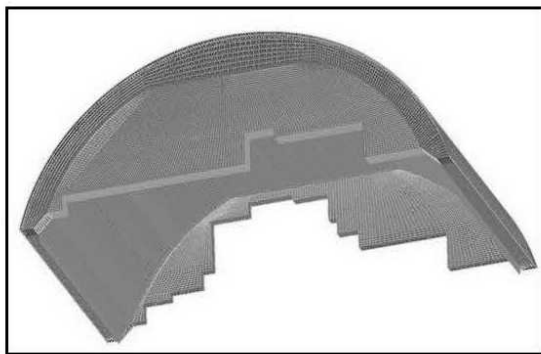


**Рис. 12. Схема системы вентиляции НБК.**

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 (рис. 12).

Ниже приводится краткое описание выбранной модели и основные результаты ее применения для детального анализа работоспособности системы вентиляции НБК. Модель учитывала основные температурные и газодинамические процессы, происходящих в НБК и ОУ.

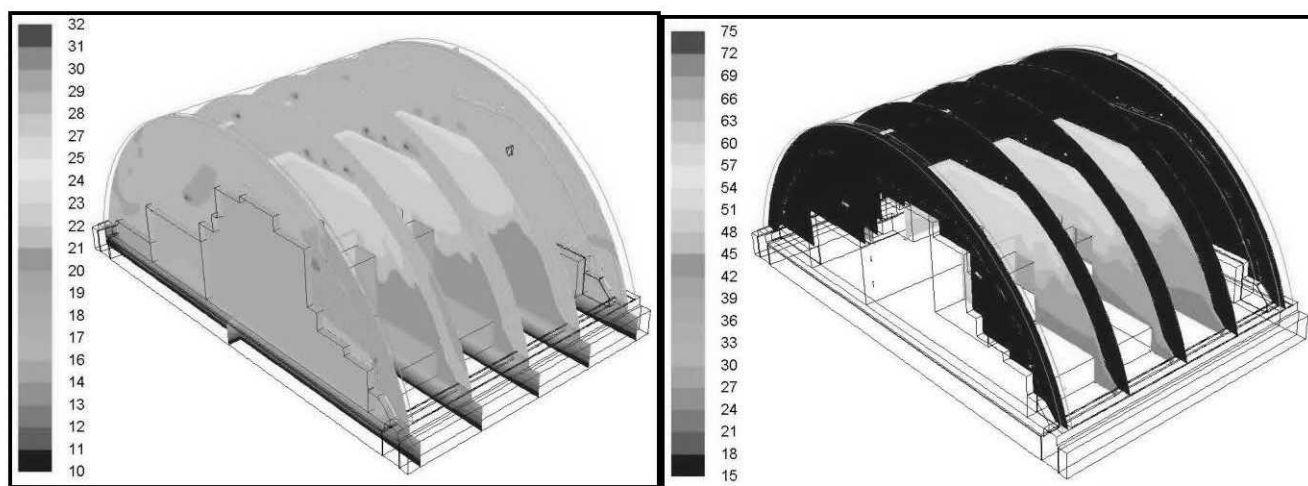
Для этого была создана 3D CFD-модель, включающая в себя как части модели Арки НБК, так и всех объектов под Аркой, включая Объект «Укрытие», грунты и фундаменты (рис. 13).



**Рис. 13. Части геометрических и сеточных моделей Арки НБК (а) и всех объектов под Аркой, включая Объект «Укрытие», грунты и фундаменты (б).**

Граничные условия на внешней оболочке Арки НБК задавались в виде условий радиационно-конвективного теплообмена и условий массообмена слабофильтрующегося воздуха и влажности между поверхностями оболочки и внешней средой при задании давлений на этих оболочках, соответствующих направлению и силе ветра, обтекающего НБК. Между всеми твердыми поверхностями НБК, ОУ, поверхностью земли и воздухом, обтекающим эти поверхности, 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.

Разработанная и кратко описанная выше модель термогазодинамических и влажностных процессов в воздушных объемах Арки НБК, всех строительных конструкциях ОУ и фундаментах и грунтах под ними была использована для детального анализа распределения температуры 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. 14 приведен пример такого распределения температуры 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.



**Рис. 14. Распределения температур (а) и влажности (б) в кольцевом и основном объемах ОУ и НБК.**

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.

Таким образом, специалисты ИТТФ в области моделирования процессов теплообмена внесли очередной вклад в решение проблем разрушенного блока ЧАЭС, а именно в проектирование Нового Безопасного Конфайнмента, который должен будет обеспечить (в течение 100 лет) демонтаж Объекта Укрытие и полную разборку разрушенного блока с конечной целью превращения этой зоны в безопасную экологически чистую зону.

### Заключение

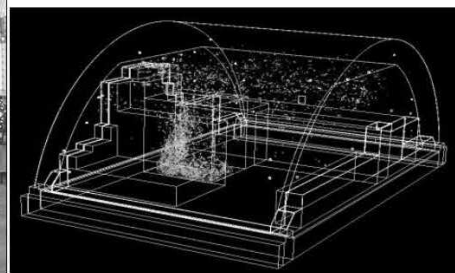
Изложенные выше работы, выполненные сотрудниками ИТТФ в различные годы на протяжении 30 лет, не закончены и продолжаются, так же, как и сотрудничество с Чернобыльской АЭС и работниками консорциума НОВАРКА. Консорциум предполагает закончить строительство уникального, не имеющего аналогов в мире сооружения НБК над разрушенным блоком, к концу 2017 г. Такое сотрудничество сопровождается возможностью посещения ЧАЭС, ОУ и НБК для встреч, совещаний и семинаров, на которых представляются и обсуждаются полученные в ИТТФ результаты. Так в 2012 г. делегация ИТТФ в составе директора А.А.Долинского (на фото (а) в центре), П.Г.Круковского (справа) и М.А.Метель (слева) посетили площадку возле ОУ и НБК (начало строительства), а также в г. Чернобыль выступили перед сотрудниками ЧАЭС с докладами о результатах моделирования ОУ и НБК.



а)



б)



в)

В 2014 г. П.Г.Круковский (на фото (б) справа) совместно с сотрудником Института проблем безопасности АЭС НАНУ Красновым В.А. (слева) посетили НБК (середина строительства), а также представили и обсудили результаты моделирования ОУ и НБК группе управления проектом НБК. В настоящее время работа продолжается в направлении совершенствования моделей анализа и прогнозирования термогазодинамического состояний ОУ и НБК и на их основе радиоактивного загрязнения объёма НБК аэрозолями (рис. в) для прогнозирования влияния на персонал и окружающую среду. Такие модели планируется ввести в систему мониторинга термогазодинамического и радиационного состояний ОУ и НБК, что позволит продолжить сотрудничество с ЧАЭС еще на долгие годы.

**WORKS OF THE INSTITUTE OF ENGINEERING THERMOPHYSICS ON  
THE SOLUTION TO THE PROBLEMS OF THE DESTROYED REACTOR  
AND NEW CONFINEMENT  
(to the 30th anniversary of the Chernobyl accident)**

**T.G. Grishchenko, P.G. Krukovskyi, G.V. Kovalenko, LV. Dekusha, L.I. Vorobiev, M.A. Metel,  
A.S. Polubinsky**

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

**Key words:** Chernobyl nuclear power plant accident, temperature transducers and measuring, computer simulation, Safe Confinement.

An activities review of employees of IETP of NAS of Ukraine on the mitigation of the implications of the accident at Unit 4 of the Chernobyl nuclear power plant, April 26, 1986 is shown. To identify and study nuclear fuel and fuel-containing material accumulation places heat flow and temperature transducers have been developed and manufactured. The work on the forecasting of probable warming up of the destroyed reactor due to being filled with various materials (concrete, expanded clay and scraps of steel pipes) was performed. Computer models were developed and the results of the analysis and forecasting of heat and gas dynamic processes are presented for the New Safe Confinement and "Object Shelter" of the Chernobyl nuclear power plant in order to verify the fitting to defined criteria of engineering systems performance.

*Получено 15.03.2016*

*Received 15.03.2016*

УДК 532.5: 536.24

## ВЛИЯНИЕ ИОНОВ ПРИМЕСИ НА КОЛИЧЕСТВО ВОДОРОДНЫХ СВЯЗЕЙ

Авраменко А.А., чл.-кор. НАН Украины, Тыринов А.И., канд. техн. наук,  
Дмитренко Н.П., канд. техн. наук, Кравчук А.В.

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

Розглянуто вплив різної кількості іонів  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  та  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$  на кількість водневих зв'язків в водному розчині. Наведено аналіз впливу часу на водневі зв'язки в водних розчинах з іонами домішок.

Рассмотрено влияние различного количества ионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , и  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$  на количество водородных связей в водном растворе. Проведен анализ влияния времени на водородные связи в водных растворах с ионами примеси.

The effect of various amounts of ions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , and  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$  on the quantity of the hydrogen bonds in aqueous solution is investigated. The effect of time on the hydrogen bonds in aqueous solutions with impurity ions is analyzed.

Библ. 16, рис. 2.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, молекулярная динамика, водородная связь, ионы примесей, молекулы.

$a$  – ускорение;  
 $F$  – сила;  
 $m$  – масса атома;  
 $n$  – количество водородных связей;  
 $t$  – время;  
 $U$  – потенциальная энергия;  
 $x$  – координата;  
 $v$  – скорость движения;

**Индексы:**

$B$  – химическая связь;

$el$  – электростатика;  
 $hb$  – водородная связь;  
 $LJ$  – взаимодействие Ван-дер-Ваальса;  
 $n$  – количество водородных связей;  
 $v$  – валентные углы;  
 $k$  – количество атомов примеси;  
 $\phi$  – торсионные углы;  
 $\omega$  – плоская группа.

**Введение**

Анализ динамики образования и разрыва водородных связей, является интересной задачей при молекулярном исследовании различных химических растворов. Водородная связь является видом химического свойства атома водорода, которое позволяет соединить (объединить) его и другой электроотрицательный атом. Указанная особенность проявляется в виде межмолекулярных и внутримолекулярных взаимодействий. Наличие водородных связей в веществе существенно влияют на его физические (температура кипения, вязкость, летучесть) и химические (кислотность) свойства. Образование водородных связей с молекулами растворителя увеличивает растворимость вещества [1].

В настоящее время существуют различные способы исследования образования и разрыва водородных связей. Одними из наиболее распро-

страненных являются методы спектроскопии [2, 3], а также моделирование с помощью различных пакетов молекулярной динамики (МД) [4 – 8]. Используя МД, авторы работы [9] исследовали различные свойства водородной связи и время их жизни. Рассматривались как случаи с чистым водным раствором, так и при наличии в указанном растворе ионов примеси при различных температурных условиях.

В работе [10] используя экспериментальные (спектральные) и компьютерные (МД) методы рассматривалась динамика поведения водородных связей в водном растворе  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$  при температуре 25...500 °С и давлении 1000 бар.

В настоящем исследовании применялся метод молекулярной динамики для выявления влияния на количество водородных связей различного количества примесей ионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ .

Метод МД был выбран из-за того, что он позволяет получить реальную информацию о строении и взаимодействии молекул того или иного вещества, а также дает возможность понять, или спрогнозировать протекание тех или иных физических и химических процессов внутри исследуемого микрообъекта. Также методы компьютерного моделирования (к которым относят МД) дают возможность связать между собой теоретические и экспериментальные наработки, особенно в тех случаях, когда аналитически сложно исследовать поведение молекул.

Метод МД стали интенсивно применять для исследования молекулярной структуры воды с конца 60-х годов прошлого столетия. Впервые метод МД предложен был в [11, 12]. Методами МД старались адекватно описать радиальные корреляционные функции распределения плотности, получаемые с помощью рентгеновской и нейтронной дифракции. Современное развитие компьютерной техники значительно расширило области использования МД. С помощью МД можно проанализировать химические и физические свойства различных веществ и материалов на наноуровне, а также особенности динамики их взаимодействия с другими средами. Указанный метод позволяет вычислить траектории движения отдельных атомов. МД дает возможность рассматривать процессы во временных масштабах в несколько наносекунд, где электростатические взаимодействия более существенны по сравнению с квантовыми эффектами.

### Математическая модель

В настоящее время общепринятой является следующая схема метода МД: рассматривается система с определенным количеством частиц и с заданным потенциалом взаимодействия между ними. В основу метода входит численное решение классических уравнений движения частиц (1) в некотором выделенном объеме среды. Для каждого атома записывается уравнение движения в виде второго закона Ньютона:

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = F_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

Предполагается, что все силы носят консервативный характер. Поэтому имеем

$$F_i(x) = - \frac{\partial U(x)}{\partial x_i}, \quad (2)$$

где  $U(x)$  – потенциальная энергия, зависящая от взаимного расположения всех атомов.

Мгновенная температура в МД моделировании определяется как средняя кинетическая энергия, приходящаяся на одну степень свободы расчетной системы:

$$T(t) = \frac{1}{3Nk_B} \sum_{i=1}^N m_i v_i^2, \quad (3)$$

где  $k_B$  – константа Больцмана. Температура среды определяется усреднением ее мгновенных значений  $T(t)$  по некоторому интервалу времени.

Потенциальная энергия, которая входит в уравнение (1), описывается выражением:

$$U(x) = U_B + U_v + U_\phi + U_\omega + U_{LJ} + U_{el} + U_{hb}, \quad (4)$$

При использовании математической модели (1) – (4) для моделирования процессов молекулярной динамики задаются периодические граничные условия, т.е. молекулы и атомы, покидающие расчетную область, вносятся в нее через противоположную границу.

Обычно при МД расчете используется алгоритм Верле [13], когда положение точки может быть вычислено без знания скорости. Данный алгоритм является компромиссом между точностью процедуры расчета и скоростью ее реализации.

Последовательность расчета имеет вид:

$$a_i(t) = \frac{F_i(x, t)}{m_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + a_i(t) \Delta t, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t) \Delta t + a_i(t) \frac{\Delta t^2}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

Для устранения эффекта нереального ускорения молекул воды, что обусловлено видом уравнений (1), при моделировании методом МД расчет проводят, учитывая условие постоянства температуры. С этой целью применяют различные приемы для поддержания постоянной температуры, используя различные способы задания термостата [14, 15]. Одним из распространенных термостатов, используемых в молекулярной

динамике, является термостат Ланжевена [16].

При учете термостатирования уравнение движения будет иметь вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\nabla U - \gamma m v_i + F^+, \quad (8)$$

Уравнение (8), в отличие от классических уравнений МД, включает две дополнительные силы: диссипативную силу  $\gamma m v_i$  и стохастическую силу  $F^+$  ( $\gamma$  – коэффициент сопротивления). Эти две силы взаимосвязаны флуктационно-диссипативной теоремой [14]. Корреляция случайной силы определяется выражением:

$$\langle F_i^+(t_1) F_j^+(t_2) \rangle = 2\gamma k_B T \delta_{ij} \delta(t_1 - t_2), \quad (9)$$

где  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $\delta$  – дельта-функция. Уравнение (9) представляет собой стохастическое уравнение Ланжевена. Для его численного решения используется метод Монте-Карло, суть

которого состоит в интегрировании по случайной выборке атомов, а не по всей системе.

### Физическая постановка задачи

На основе изложенной методики было проведено компьютерное моделирование влияния различного количества примесей в воде, а именно, ионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$  на образование или разрыв водородных связей. Рассматриваемый водный раствор (чистый) состоял из 10 тыс. молекул, в который вводилось разное количество ионов примеси. Исследовались четыре варианта конфигураций: первый – чистая среда (только молекулы воды), второй – в водные растворы вводятся 250 ионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ , третья – в воду вводятся 500 ионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ , четвертая – в воду вводятся 750 ионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ . Системы рассматривались при температуре 298 К с периодическими граничными условиями.

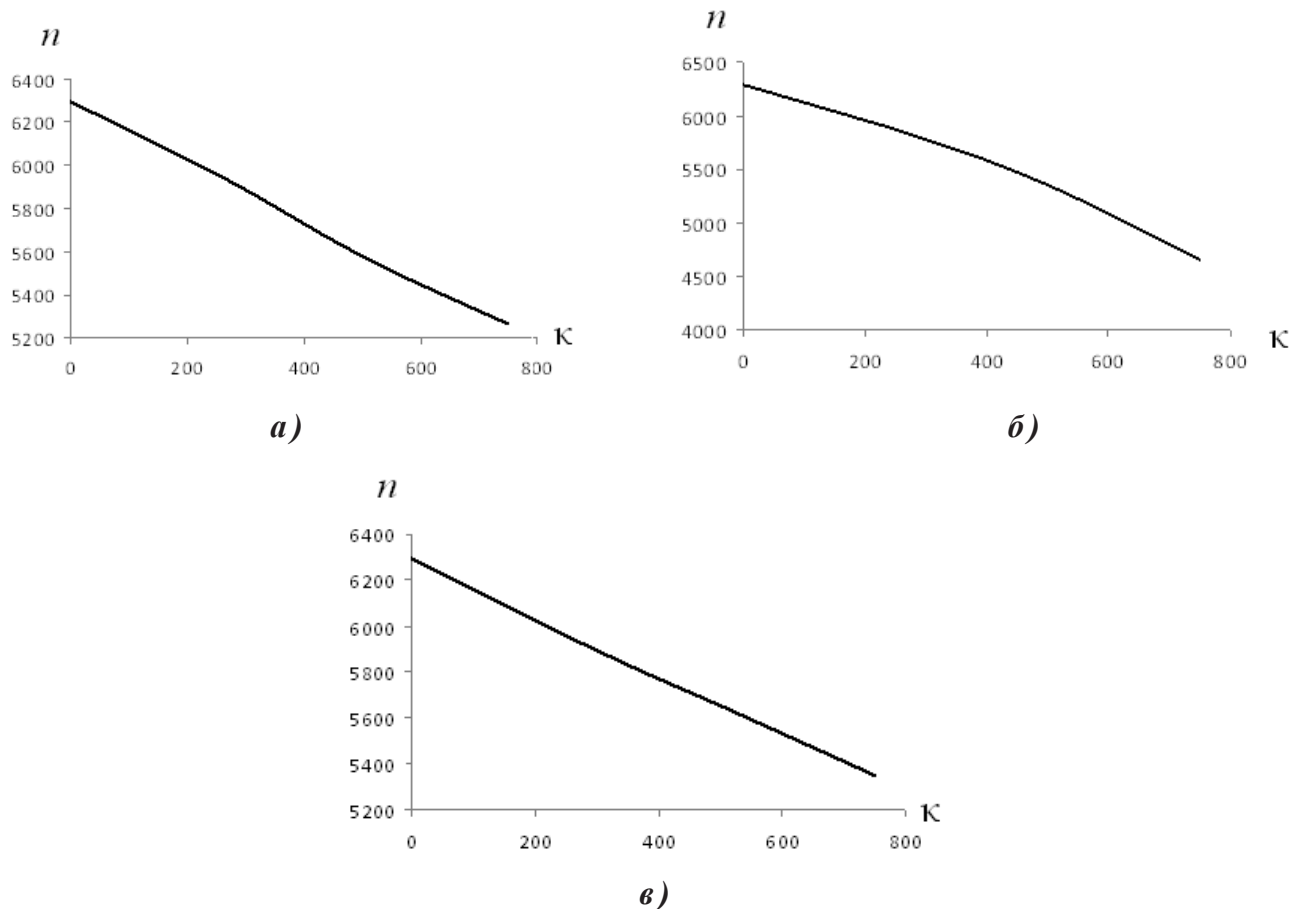


Рис. 1. Зависимость количества водородных связей от концентрации ионов примесей: а) –  $\text{Cl}^-$ ; б) –  $\text{Na}^+$ ; и в) –  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ .

На рис. 1 представлены результаты исследования зависимости количества водородных связей от различной концентрации ионов примесей  $\text{Cl}^-$  (а),  $\text{Na}^+$  (б) и  $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$  (в). Из рисунков видно, что ионы примесей оказывают существенное влияние на количество водородных связей, а именно, их увеличение способствует уменьшению количества водородных связей. Ионы примесей не образуют водородные связи. Такой эффект скорее всего связан с диполь-дипольным взаимодействием. Водородная связь имеет электростатическую компоненту. В отличие от нее диполь-дипольное взаимодействие состоит в ковалентной составляющей. Если рассматривать

случай, где примесью являются ионы хлора, то там нет или очень мало орбитального смешивания между наивысшей молекулярной орбиталью  $\text{Cl}^-$  и наинизшей орбиталью H. А без орбитального смешивания водородные связи не образуются. Существует только диполь-дипольное взаимодействие.

Уменьшение количества водородных связей в рассмотренных растворах с увеличением концентрации примесей объясняется еще и тем, что введенные ионы имеют существенные размеры, и их добавление в чистый раствор способствует заполнению пространства, необходимого для образования указанных связей.

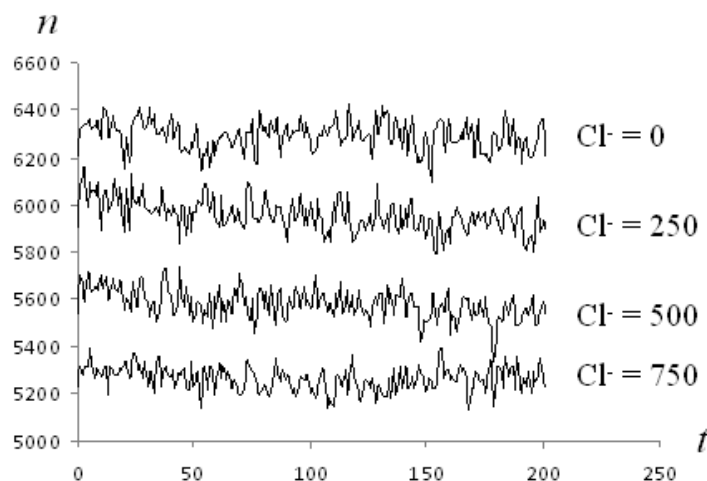


Рис. 2. Зависимость количества водородных связей от концентрации ионов  $\text{Cl}^-$ .

Также рассматривались случаи влияния времени на количество водородных связей в водных растворах с ионами  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ . Как видно из рис. 2, временной фактор не оказывал существенного влияния на образование или разрыв водородных связей в водном растворе с различной концентрацией примесей  $\text{Cl}^-$ . В статье приведены результаты моделирования только для водного раствора с ионами  $\text{Cl}^-$ , так как для других растворов характер результатов идентичен.

### Выводы

В настоящей работе приведены результаты компьютерного исследования влияния ионов примесей на количество водородных связей в водном растворе методом МД. Установлено, что увеличение концентрации ионов примесей при-

водит к уменьшению количества водородных связей. При этом временной фактор не оказывает какого-либо существенного влияния. Из результатов также видно, что наибольшее влияние на уменьшение водородных связей в водном растворе оказывают ионы  $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметов Н.С. Общая неорганическая химия: Учебник для вузов / Н.С. Ахметов. — М.: Высш. Школа, 1981. — 679 с.
2. Казицина Л.А., Куплетская Н.Б. Применение Уф, ИК, и ЯМР — спектрографии в органической химии / Л.А. Казицина, Н.Б. Куплетская. — М.: изд. Высш. Школа, 1971, — 264 с.
3. Отто М. Современные методы аналитической химии / М. Отто. — М.: Техносфера, 2008

– 544 с.

4. *Quirke N.* Adsorption and transport at the nanoscale / N. Quirke. – London –New York: Boca Raton, 2006. – 189 p.

5. *MacElroy J.M.D.* Nonequilibrium molecular dynamics simulation of diffusion and flow in thin microporous membranes // *Journal of chemical physics.* – 1994. – V. 101, N 6. – P. 5274-5280.

6. *Frenkel D., Smit B.* Understanding molecular simulation / D.Frenkel, B.Smit. – London: Academic Press, 1996. – 443 p.

7. *Rapaport D.C.* The art of molecular dynamics simulation / D.C. Rapaport. – London: Cambridge University Press, – 1996. – 400 p.

8. *Товбин Ю.К.* Метод молекулярной динамики в физической химии / Ю.К. Товбин – М.: Наука, – 1996. – 334 с.

9. *Chandra A.* Structure and dynamics of hydrogen bonds in liquid water and aqueous solutions // *Proc. Indian Nat. Sci. Akad.* – 2003. – N 1. – pp. 49–59.

10. *Bondarenko G.V., Gorbaty Yu. E., Okhulkov A.V.* Structure and hydrogen bonding in liquid and supercritical aqueous NaCl solutions at pressure

1000 bar and temperature up to 500 °C: a comprehensive experimental and computational study // *J. Chem. Phys.* – 2006. – V. 110. – pp. 4042–4052.

11. *Alder, B. J., and Wainwright, T. E.* Phase transition for hard sphere system // *J. Chem. Phys.* – 1957. – V. 2. – pp. 1208–1209.

12. *Alder, B. J., and Wainwright, T. E.* Studies in molecular dynamics. I. General method // *J. Chem. Phys.* – 1959. – V. 31. – pp.459–466

13. *Verlet L.* Computer experiments on classical fluids. Thermodynamic properties of Lennard-Jones molecules // *Phys. Rev.* –1967. – V. 159. – P. 98–103.

14. *Allen M.P., Tildesley D.J.* Computer Simulation of Liquids / M.P Allen, D.J. Tildesley – Oxford: Clarendon Press, – 1988. – 387 p.

15. *Frenkel D., Smit B.* Understanding Molecular Simulation: From Algorithms to Applications / D. Frenkel, B. Smit – San Diego: Academic Press, – 2002. – 638 p.

16. *Heo S.J., Sinnott S.B., Brenner D.N., Harrison J.A.* Nanotribology and nanomechanics / S.J. Heo, S.B. Sinnott, D.N. Brenner, J.A. Harrison – Berlin: Springer, – 2005. – 621 p.

# THE INFLUENCE OF IMPURITIES ON THE NUMBER OF HYDROGEN BONDS

Avramenko A.A., Tyrinon A.I., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V.

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

The article the influence of different amounts of impurity ions, namely,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NaCl}$  on hydrogen bonds in aqueous solution is investigated. The study was conducted using the method of molecular dynamics. It is found that increasing the concentration of the impurity ions reduces the amount of hydrogen bonding. At this time factor does not appear to have any significant effect. From the results also clear that the greatest impact on the reduction of the hydrogen bonds in aqueous solution having ions  $\text{NaCl}$ .

References 16, figures 2.

**Key words:** computer simulation, molecular dynamics, hydrogen bond, impurity ions, molecules.

References 16, figures 2.

1. *Akhmetov N.S.* General Inorganic Chemistry: Textbook for Universities / N.S. Akhmetov. – M.: Higher School, 1981. – 679 p.

2. *Kazitsina L.A., Kupletskaya N.B.* Application of UV, IR, and NMR – Spectrograph in organic chemistry / L.A. Kazitsina, NB Kupletskaya. – M.: Ed. Executive. School, 1971 – 264 p.

3. *Otto M.* Modern methods of analytical chemistry / M. Otto. – M.: Technosphere, 2008 – 544 p.

4. *Quirke N.* Adsorption and transport at the nanoscale / N. Quirke. – London – New York: Boca Raton, 2006. – 189 p.

5. *MacElroy J.M.D.* Nonequilibrium molecular

dynamics simulation of diffusion and flow in thin microporous membranes // Journal of chemical physics. – 1994. – V. 101, N 6. – P. 5274-5280.

6. *Frenkel D., Smit B.* Understanding molecular simulation / D.Frenkel, B.Smit. – London: Academic Press, 1996. – 443 p.

7. *Rapaport D.C.* The art of molecular dynamics simulation / D.C. Rapaport. – London: Cambridge University Press, – 1996. – 400 p.

8. *Tovbin J.K.* The method of molecular dynamics in physical chemistry / J.K. Tovbin – M.: Nauka, – 1996. – 334 p.

9. *Chandra A.* Structure and dynamics of hydrogen bonds in liquid water and aqueous solutions // Proc. Indian Nat. Sci. Akad. – 2003. – N 1. – pp. 49–59.

10. *Bondarenko G.V., Gorbaty Yu. E., Okhulkov A.V.* Structure and hydrogen bonding in liquid and supercritical aqueous  $\text{NaCl}$  solutions at pressure 1000 bar and temperature up to 500 °C: a comprehensive experimental and computational study // J. Chem. Phys. – 2006. – V. 110. – pp. 4042–4052.

11. *Alder, B. J., and Wainwright, T. E.* Phase transition for hard sphere system // J. Chem. Phys. – 1957. – V. 2. – pp. 1208–1209.

12. *Alder, B. J., and Wainwright, T. E.* Studies in molecular dynamics. I. General method // J. Chem. Phys. – 1959. – V. 31. – pp.459–466

13. *Verlet L.* Computer experiments on classical fluids. Thermodynamic properties of Lennard-Jones molecules // Phys. Rev. – 1967. – V. 159. – P. 98–103.

14. *Allen M.P., Tildesley D.J.* Computer Simulation of Liquids / M.P Allen, D.J. Tildesley – Oxford: Clarendon Press, – 1988. – 387 p.

15. *Frenkel D., Smit B.* Understanding Molecular Simulation: From Algorithms to Applications / D. Frenkel, B. Smit – San Diego: Academic Press, – 2002. – 638 p.

16. *Heo S.J., Sinnott S.B., Brenner D.N., Harrison J.A.* Nanotribology and nanomechanics / S.J. Heo, S.B. Sinnott, D.N. Brenner, J.A. Harrison – Berlin: Springer, – 2005. – 621 p.

Получено 19.01.2016

Received 19.01.2016

УДК 532.542.86. (088.8)

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОКОЛЕБАНИЙ В РЕКУПЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ АГРЕГАТОВ

Басок Б.И., член-корреспондент НАН Украины, Гоцуленко В.В., доктор техн. наук

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

Обґрунтований механізм від'ємного опору в потоці рідини при її стисненні і теплопідводі. Використовуючи емпіричне рівняння Тейта, одержана система рівнянь нестационарного руху рідини в пристроях із зосередженими параметрами, визначені їх періодичні автоколивальні розв'язки.

Обоснован механизм отрицательного сопротивления в потоке жидкости при ее сжатии и теплоподводе. Используя эмпирическое уравнение Тейта, получена система уравнений нестационарного движения жидкости в устройствах с сосредоточенными параметрами, определены их периодические автоколебательные решения.

The mechanism of negative resistance in a stream of a liquid is proved at her compression and a supply of heat. Using empirical Teta's equation, the system of the equations of non-stationary movement of a liquid in devices with the concentrated parameters is received, their periodic self-oscillatory decisions are determined.

Библ. 12. рис. 5.

**Ключевые слова:** тепловое сопротивление, автоколебания, предельный цикл, бифуркация, запаздывание парообразования.

### Введение

Рекуперативные теплообменники используются в качестве холодильников при охлаждении фурм доменной печи, элементов ее конструкции, компрессоров и других энергетических устройств, охлаждаемых водой.

Известно [1], что при подводе теплоты к потоку жидкости или газа образуется тепловое сопротивление, которое наблюдается при движении идеальных жидкостей или газов [2]. Образование нисходящих ветвей зависимости  $h_l(G)$  гидравлических потерь по длине [3] при ламинарном движении нагретого воздуха и теплового сопротивления  $h_T(G)$  [4], которое от режима движения не зависит, составляют механизмы возбуждения автоколебаний феномена Рийке. Кроме того, отрицательное тепловое сопротивление  $h_T(G)$  наряду с известным механизмом  $\tau$  запаздывания сгорания, обоснованного Л. Крокко, является механизмом вибрационного горения, который оставался неизвестным. В явлении «поющего» пламени Хиггинса [5] наблюдается диаметрально противоположность изменения автоколебаний, самовозбуждающихся от запаздывания  $\tau$  и механизма теплоподвода, когда волно-

вое сопротивление  $Z$  колебательного контура изменяется варьированием его акустической гибкости  $C_a$ .

Образование восходящей (неустойчивой) ветви на напорной характеристике  $F(G)$  витка парообразования также происходит из-за наличия нисходящей ветви отрицательного сопротивления парообразования [6].

Механизмы, связанные с нисходящими ветвями сопротивлений различной природы, являются причиной возбуждения автоколебаний в явлении вольтовой дуги, при работе триода [7], в различных механических системах [8], но в гидропневмосистемах они оставались не обоснованными [9].

### Обоснование нисходящей ветви теплового сопротивления в потоке жидкости

Рассмотрим гидросистему (рис. 1), в которой под напором  $H$  происходит истечение жидкости. Воспользовавшись уравнением Бернулли для сечений 1 – 1 и 2 – 2, определим скорость истечения идеальной жидкости при отсутствии ее нагрева в зависимости от напора  $H$

$$H = \frac{w_x^2}{2g}, \quad (1)$$

где  $w_x$  – скорость движения холодной жидкости.

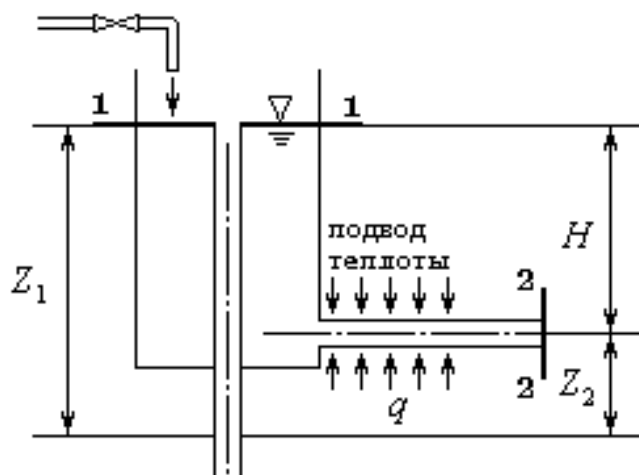


Рис. 1. К определению теплового сопротивления.

Подвод теплоты, при той же величине напора  $H$ , увеличивает скорость движения  $w_H$  нагретой невязкой жидкости, что приводит к возникновению сопротивления  $h_T(G)$ . Уравнение Бернулли для сечений 1 – 1 и 2 – 2 при подводе теплоты следующее:

$$Z_1 + \frac{p_0}{\rho_0 g} + \frac{w_0^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_0}{\rho_H g} + \frac{w_H^2}{2g} + h_T(G). \quad (2)$$

Поскольку напор  $H = Z_1 - Z_2$ , а скорость воды в емкости большого сечения  $w_0 \approx 0$  и избыточное давление  $p_0 \approx 0$ , то из (2) следует

$$h_T(G) = H - \frac{w_H^2}{2g}. \quad (3)$$

Исключив напор в уравнении (3), используя зависимость (1), приходим к соотношению

$$h_T(G) = \frac{w_X^2 - w_H^2}{2g}, \quad (4)$$

где  $w_X$  и  $w_H$  соответственно скорости холодной и нагретой жидкости.

Из уравнения неразрывности потока при постоянной нормальной площади сечения канала  $\rho_0 w_X = \rho_{t,0} w_H$  определим отношение скоростей  $w_H/w_X$ , и исключив его в уравнении (4), окончательно получим

$$h_T(G) = \frac{w_X^2}{2g} \left[ 1 - \left( \frac{\rho_0}{\rho_{t,0}} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где  $\rho_{0,t}$  плотность нагретой жидкости при давлении  $p_0$ .

#### Уравнения движения жидкости в устройстве охлаждения фурмы

Скорость потока жидкости на входе в устройство охлаждения фурмы доменной печи (рис. 2) равна  $w_X = w_0$ . Плотность технической воды на выходе из трубопровода 2 равна  $\rho_{0,p}$ , а после нагрева в фурме  $\rho_{t,p}$ .

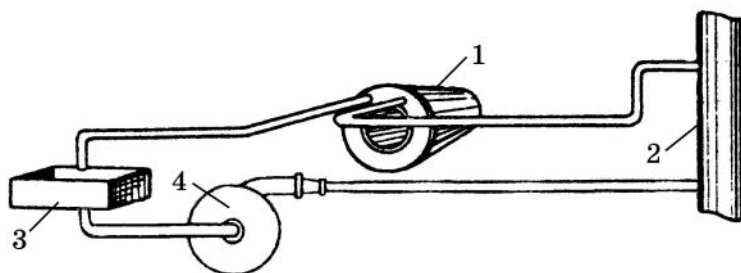


Рис. 2. Схема модели охлаждения фурмы доменной печи технической водой, где: 1 – фурма, 2 – трубопровод подачи технической воды, 3 – воронка, 4 – насос.

При подводе теплоты к жидкости под давлением  $p_k$  на ее входе, тепловое сопротивление в фурме определяется выражением

$$h_T(G) = \frac{w_0^2}{2g} \left[ 1 - \left( \frac{\rho_{0,p}}{\rho_{t,p}} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Воспользовавшись уравнением Тэйта [10] для жидкости  $p = P_* \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma$  определим ее плотность  $\rho_{0,p}$  на входе в фурму

$$\rho_{0,p} = \rho_0 \left( \frac{P}{P_*} \right)^{1/\gamma}, \quad (7)$$

где  $P_*$  – давление при плотности  $\rho_0$  жидкости на входе в насос является эмпирической постоянной,  $p$  – давление на входе в фурму,  $\gamma$  – показатель степени, также величина эмпирическая [10]. Из формулы (7) найдем величину  $\rho_0$  и исключим ее в уравнении (6). Получим

$$h_T(G) = \frac{w_0^2}{2g} \left[ 1 - \left( \frac{\rho_0}{\rho_{t,p}} \right)^2 \left( \frac{P}{P_*} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \right]. \quad (8)$$

При нагреве жидкости с начальной плотностью  $\rho_0$  на величину температуры  $\Delta T$ , ее плотность становится равной  $\rho_{t,0} = \rho_0 (1 + \beta_T \Delta T)^{-1}$ , а при повышении давления на величину  $\Delta p$ , она определяется следующим выражением

$$\rho_{t,p} = \rho_0 (1 + \beta_T \Delta T)^{-1} (1 - \beta_p \Delta p)^{-1}.$$

Поскольку  $\beta_p \Delta p = \frac{\Delta p}{K}$  является малой величиной, то плотность воды изменяется главным образом из-за температуры [11], т.е.  $\rho_{t,p} = \rho_0 (1 + \beta_T \Delta T)^{-1}$ . Так как  $\rho_0 = \rho_{0,p}$ , то

$$\rho_{t,p} = \rho_{0,p} (1 + \beta_T \Delta T)^{-1}. \quad (9)$$

Тогда тепловое сопротивление  $h_t(G)$  после сжатия воды насосом в трубопроводе технической воды и ее нагреве в фурме, когда  $\rho = \rho_{t,p}$ , определяется в соответствии с уравнением (8) следующей формулой

$$h_T = \xi_T \frac{w_0^2}{2g}, \quad \left[ \left( \frac{P_*}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} (1 + \beta_T \Delta T) \right]^2$$

где  $\xi_T = 1 - \left[ \left( \frac{P_*}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} (1 + \beta_T \Delta T) \right]^2$ ,  $\Delta T$  – повышение температуры воды на выходе из фурмы,  $\beta_T$  – коэффициент теплового расширения,  $w_x = w_0$  – скорость воды на входе в фурму. Для воды [10]  $P_* = 3250 \text{ кг/см}^2$ ,  $\gamma = 7.1$ .

В задачах динамики гидросистем одной из определяющих величин является акустическая гибкость колебательного контура, характеризующая сжимаемость жидкости. Определим ее величину, воспользовавшись уравнением Тэйта. При этом следует учесть уравнение, определяющее модуль объемной упругости жидкости [10]

$$K = \rho_0 \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} = \gamma P_*. \quad (10)$$

Из уравнения Тэйта  $p = P_* \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma$  [10] находим величину  $\partial p / \partial \rho_{0,p}$  и, воспользовавшись формулой  $c = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}}$ , приходим к уравнению

$$\frac{\partial p}{\partial \rho_{0,p}} = P_* \left( \frac{\rho_{0,p}}{\rho_0} \right)^{\gamma-1} \frac{\gamma \cdot c^2}{K}, \quad (11)$$

где  $c$  – скорость звука.

Учитывая, что  $\gamma P_* = K$  из (11) следует, что

$$\frac{\partial p}{\partial \rho_{0,p}} = c^2 \left( \frac{\rho_{0,p}}{\rho_0} \right)^{\gamma-1},$$

откуда, воспользовавшись уравнением Тэйта, приходим к следующему соотношению

$$\frac{\partial p}{\partial \rho_{0,p}} = c^2 \left( \frac{P}{P_*} \right)^{1-\frac{1}{\gamma}},$$

из которого согласно (9) окончательно получаем

$$\frac{\partial p}{\partial \rho_{0,p}} = P_* \left( \frac{\rho_{0,p}}{\rho_0} \right)^{\gamma-1} \frac{\gamma \cdot c^2}{K}. \quad (12)$$

Запишем уравнение учитывающие накопление массы в емкости трубопровода с нагретой водой

$$V \frac{d\rho_{t,p}}{dt} = G_0 - G, \quad (13)$$

где  $V$  – объем магистрали с нагретой водой,  $G_0$  – расход подаваемый насосом,  $G$  – выходящий из гидросистемы массовый расход, который определяется зависимостью  $p = \varphi(G) \Leftrightarrow p = k_T G^2$  гидравлических потерь при движении нагретой воды.

Учитывая зависимость (12), уравнение (13) примет вид [6]

$$C_a \frac{dp}{dt} = G_0 - \varphi(p), \quad (14)$$

где  $C_a = \frac{V}{c^2 (1 + \beta_T \Delta T)} \left( \frac{P_*}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$  – акустическая

емкость колебательного контура (рис. 2).

Уравнение движения холодной воды запишем в форме [6]

$$L_a \frac{dG_0}{dt} = p_k - h_\Sigma(G_0) - p, \quad (15)$$

где  $h_\Sigma(G_0) = h_T(G_0) - h_\ell(G_0)$ ,  $L_a = \ell_0/S$ ,  $\ell_0$  – длина трубопровода с холодной водой,  $S$  – площадь поперечного сечения,  $p_k$  – давление в трубопроводе технической воды.

Полагая  $F(G_0) = p_k - h_T(G_0) - h_\ell(G_0)$ , уравнение движения (15) окончательно примет вид [12]

$$L_a \frac{dG_0}{dt} = F(G_0) - p. \quad (16)$$

Система нелинейных уравнений (14), (16) определяет нестационарный режим движения нагреваемой жидкости в рекуперативных теплообменных аппаратах.

Вязкостные потери  $h_\ell(G_0)$  по длине трубопровода при движении воды на подогревательном участке для различных режимов движения определены в [6]. На рис. 3 приведена зависимость суммарных гидравлических потерь  $h_\Sigma(G_0)$  с ветвью отрицательного сопротивления, которая образуется в зоне перехода ламинарного режима в турбулентный [6] и приводит к возбуждению автоколебаний [7-8]. Данные автоколебания теоретически получаются как периодические решения нелинейной автономной динамической системы (14), (16), форма которых и соответствующий им предельный цикл также приведены на рис. 3. Для определения предельного цикла и автоколебательных решений системы уравнений (14), (16) использовался алгоритм, разработанный в [3].

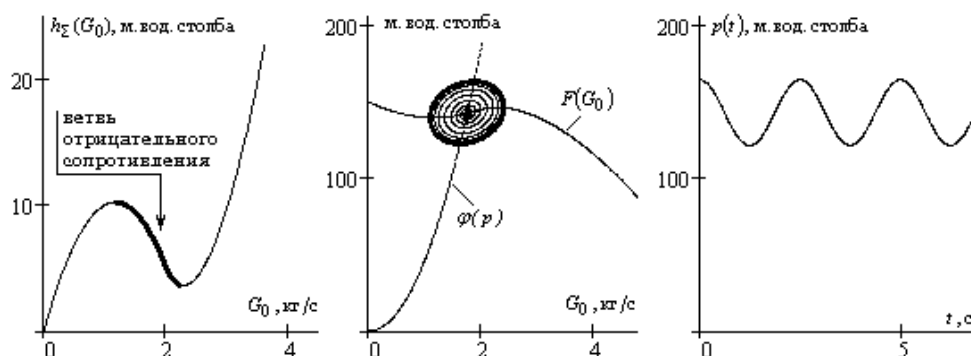


Рис. 3. Зависимость суммарного сопротивления  $h_\Sigma(G_0)$ , предельный цикл и форма автоколебаний  $p(t)$  в рассматриваемой модели (рис. 2) устройства охлаждения фурмы при  $\xi = 1,75$  кг/с.

При увеличении стационарного расхода  $G_0 = \xi$  в гидросистеме (рис. 2) наблюдается переход от устойчивых стационарных режимов в области малых подач в неустойчивую область возбуждения автоколебаний значительных

амплитуд. С дальнейшим увеличением расхода  $\xi$  (рис. 4) предельный цикл бифурцирует в устойчивый фокус на нисходящей ветви характеристики  $F(G_0)$ .

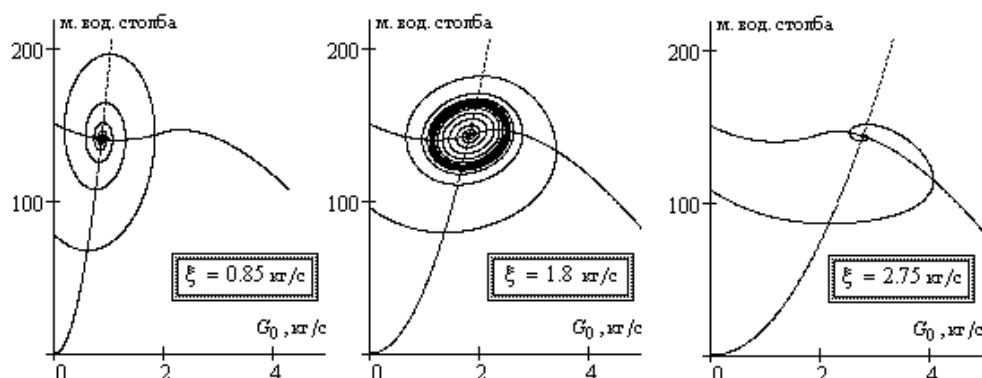


Рис. 4. Бифуркация предельного цикла при варьировании расхода  $\xi$ .

Если на поверхности охлаждающей спиральной трубки в фурме наблюдается вскипание воды, то уменьшается скорость распространения звука в воде до минимального значения  $c_{\min}$ , а далее с увеличением степени сухости  $x$  пара она возрастает до значения  $c = c|_{x=1}$ . При этом возрастает акустическая гибкость  $C_a = V/c^2$  и появляется транспортное запаздывание  $\tau$  парообразования.

В этом случае уравнение сохранения массы (13) становится с запаздывающим аргументом и имеет вид

$$C_a \frac{dp}{dt} = G_0(t - \tau) - \varphi(p). \quad (17)$$

Характер деформации предельного цикла с ростом запаздывания парообразования приведен на рис. 5.

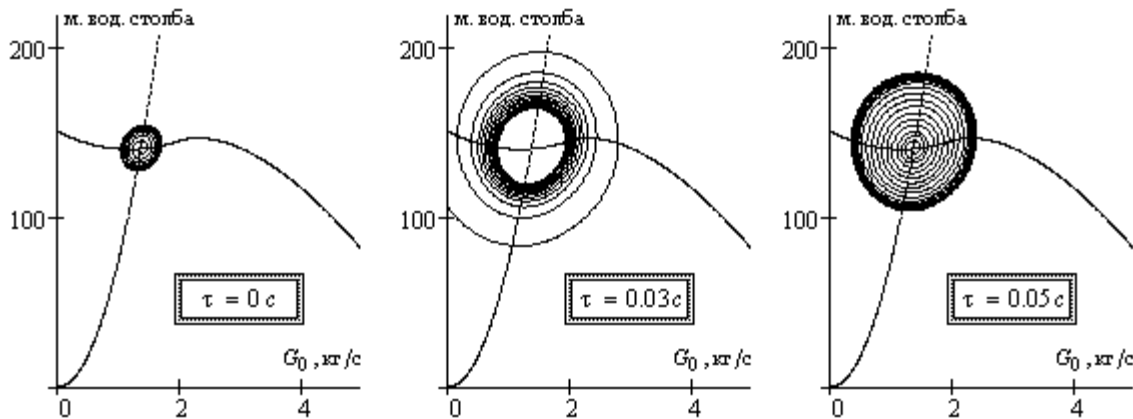


Рис. 5. Изменение предельного цикла с ростом  $\tau$  запаздывания парообразования.

**Определение границы области устойчивости: условия самовозбуждения автоколебаний**

Параметры стационарного режима течения жидкости определяются из системы дифференциально-разностных уравнений (16) – (17), полагая в ней  $dG_0/dt = 0$  и  $dp/dt = 0$ .

Воспользовавшись разложением Тейлора

$$G_0(t - \tau) = G_0(t) - \tau \frac{dG_0}{dt} + O(\tau^2),$$

система (16) – (17), с точностью до величин порядка  $O(\tau^2)$ , запишется в следующей форме:

$$\begin{aligned} L_a \frac{dG_0}{dt} &= F(G_0) - p, \\ C_a \frac{dp}{dt} &= G_0 - \frac{\tau}{L_a} (F(G_0) - p) - \varphi(p). \end{aligned} \quad (18)$$

Далее более удобно перейти к безразмерным переменным:

$$x = \frac{G_0 - \xi}{\xi}, \quad y = \frac{p - \eta}{\eta}, \quad (19)$$

где введено обозначение  $\eta = F(\xi)$ . В переменных (19) система уравнений (18) запишется в следующем виде:

$$\xi L_a \frac{dx}{dt} = F(\xi + \xi x) - \eta(y + 1),$$

$$\eta C_a \frac{dy}{dt} = (x + 1)\xi - \tau \left( \frac{F(\xi + \xi x) - \eta(y + 1)}{L_a} \right) - \xi(y + 1)^{1/2}. \quad (20)$$

Таким образом, характер устойчивости стационарного режима течения жидкости, в рассматриваемой задаче (рис. 2), окончательно сводится к исследованию устойчивости нулевого положения равновесия динамической системы (20). Согласно первому методу Ляпунова [7] исследования устойчивости рассмотрим матрицу Якоби системы (20), вычисленной в ее нулевом положении равновесия.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \frac{dF(G_0)}{dG_0} \Big|_{G_0=\xi} & -\frac{\eta}{\xi L_a} \\ \frac{\xi}{\eta C_a} \left( 1 - \frac{\tau}{L_a} \frac{dF(G_0)}{dG_0} \Big|_{G_0=\xi} \right) & \frac{1}{C_a} \left( \frac{\tau}{L_a} - \frac{1}{2} \frac{\xi}{\eta} \right) \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Для определения критического времени запаздывания парообразования  $\tau_{кр}$  необходимо предварительно вычислить корни характеристического уравнения:

$$\det(J - \lambda E) = 0. \quad (22)$$

Раскрывая определитель (22), получаем

$$\lambda_{1,2} = \frac{\text{tr}(J) \pm i \sqrt{4 \det(J) - \text{tr}^2(J)}}{2},$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tr}(\mathbf{J}) &= \frac{1}{L_a} \frac{dF(G_0)}{dG_0} \Big|_{G_0=\xi} + \frac{1}{C_a} \left( \frac{\tau}{L_a} - \frac{1}{2} \frac{\xi}{\eta} \right), \\ \det(\mathbf{J}) &= \frac{1}{L_a C_a} \frac{dF(G_0)}{dG_0} \Big|_{G_0=\xi} \left( \frac{\tau}{L_a} - \frac{1}{2} \frac{\xi}{\eta} \right) + \\ &+ \frac{1}{L_a C_a} \left( 1 - \tau \frac{dF(G_0)}{dG_0} \Big|_{G_0=\xi} \right). \end{aligned}$$

Таким образом, критическое время запаздывания парообразования определяется из условия:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\{\lambda_{1,2}\} = 0 &\Leftrightarrow \operatorname{tr}(\mathbf{J}) = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{L_a} \frac{dF(G)}{dG} \Big|_{G=\xi} + \\ &+ \frac{1}{C_a} \left( \frac{\tau_{\text{кр}}}{L_a} - \frac{1}{2} \frac{\xi}{\eta} \right) = 0, \end{aligned}$$

откуда окончательно получаем, что

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{1}{2} \frac{\xi L_a}{F(\xi)} - C_a \frac{dF(G_0)}{dG_0} \Big|_{G_0=\xi}.$$

Следовательно, стационарный режим течения жидкости является устойчивым при выполнении неравенства  $\tau < \tau_{\text{кр}}$ . Соответственно при выполнении противоположного неравенства стационарный режим является неустойчивым и даже бесконечно малые его возмущения приводят к самовозбуждению автоколебаний.

### Выводы

1. Используя эмпирическое уравнение Тэйта, обоснован механизм отрицательного сопротивления в жидкости при ее сжатии и теплоподводе.

2. Получена математическая модель автоколебаний, самовозбуждающихся из-за действия рассматриваемого механизма неустойчивости и установлен характер их изменения при варьировании стационарного массового расхода жидкости и запаздывания  $\tau$  парообразования.

3. Установленная бифуркация предельного цикла при варьировании стационарного расхода жидкости позволяет осуществить управление амплитудой самовозбуждающихся автоколебаний.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика / Абрамович Г. Н. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
2. *Раушенбах Б.В.* Вибрационное горение / Раушенбах Б. В. – М.: Физматгиз, 1961. – 500 с.
3. *Гоцуленко В.В.* Математическое моделирование особенностей феномена Рийке / В.В. Гоцуленко // Математическое моделирование, РАН. – 2004. – Т. 16, № 9. – С. 23 – 28.
4. *Гоцуленко В.В.* Тепловое сопротивление как механизм возбуждения автоколебаний / В.В. Гоцуленко, В.Н. Гоцуленко // Сборник научн. трудов Днепропетровского гос. техн. ун-та. – Днепропетровск, 2009. – С. 95 – 100.
5. *Гоцуленко В.В.* Управление автоколебаниями колеблющегося пламени при одновременном действии механизмов их возбуждения / В. В. Гоцуленко, Б. И. Басок // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 3. – С. 101 – 107.
6. *Басок Б.И.* Периодические движения теплоносителя в моделях элементов парогенераторов / Б. И. Басок, В. В. Гоцуленко // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т.32, № 4. – С. 33 – 42.
7. *Меркин Д.Р.* Введение в теорию устойчивости движения / Меркин Д. Р. – М.: Наука, 1971. – 312 с.
8. *Стрелков С.П.* Введение в теорию колебаний / Стрелков С. П. – М.: Наука, 1964. – 437 с.
9. *Гершуни Г.З.* Гидродинамическая неустойчивость. Изотермические течения / Г. З. Гершуни // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 2. – С. 99 – 106.
10. *Зарембо Л.К.* Введение в нелинейную акустику / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. – М.: Наука, 1966. – 519 с.
11. *Гинзбург И.П.* Прикладная гидрогазодинамика. / Гинзбург И. П. – Л.: Изд-во Ленинградского. ун-та, 1958. – 338 с.
12. *Басок Б.И.* Расчет параметров автоколебаний в вертикальной камере горения воздушно-нагревателя доменной печи при неустойчивом горении / Б. И. Басок, В. В. Гоцуленко // Теплоэнергетика. – 2015. – № 1. – С. 59 – 64.

# **THERMOPHYSICAL MODEL OF SELF - OSCILLATIONS IN A RECUPERATIVE HEAT EXCHANGER REFRIGERATOR INDUSTRIAL AGGREGATES**

**Basok B.I., Gotsulenko V.V.**

Institute of Engineering Thermophysics of the  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv-57, 03057, Ukraine

The mechanism of negative resistance in a stream of a liquid is proved at her compression and a supply of heat. Using empirical Teta's equation, the system of the equations of non-stationary movement of a liquid in devices with the concentrated parameters is received, their periodic self-oscillatory decisions are determined.

References 12, figures 5.

**Key words:** thermal resistance, self-oscillation, limit cycle, bifurcation, the delay of evaporation.

1. *Abramovich G.N.* Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied Gas Dynamics]. – Moscow: Nauka. – 1969. – 824 p. (Rus.)
2. *Raushenbah B.V.* Vibratsionnoe gorenje [Vibrating combustion]. – Moscow: Fizmatiz. – 1961. – 500 p. (Rus.)
3. *Gotsulenko V.V.* Matematicheskoe modelirovanie osobennostej fenomena Rijke [Mathematical modeling of Rijke's phenomenon] // Matematicheskoe modelirovanie. – 2004. – V. 16, № 9. – P. 23 – 28. (Rus.)
4. *Gotsulenko V.V., Gotsulenko, V.N.* Teplovoe soprotivlenie kak mehanizm возбуждения автоклебаний [Thermal resistance as a mechanism of excitation of oscillations]. // Sbornik nauchnykh trudov Dneprodzerzhinskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2009. – V. 1 (11). – P. 95 – 100. (Rus.)
5. *Gotsulenko V.V., Basok B.I.* Upravlenie avtoklebaniyami koleblyushhegosya plameni pri odnovremennom dejstvii mexanizmov ix возбуждения [Control self-oscillations of the oscillating flame under the simultaneous action of

their excitation mechanisms] // Promyshlennaya teplotekhnika. – 2009. – V. 31, № 3. – P. 101 – 107. (Rus.)

6. *Basok B.I., Gotsulenko V.V.* Periodicheskie dvizheniya teplonositelya v modelyax elementov parogeneratorov [Periodic movements of coolant in the steam generator model elements] // Promyshlennaya teplotekhnika. – 2010. – V.32, № 4. – P. 33 – 42. (Rus.)

7. *Merkin D.R.* Vvedenie v teoriyu ustojchivosti dvizheniya [Introduction to the theory of stability of motion]. – Moscow: Nauka. – 1971. – 312 p. (Rus.)

8. *Strelkov S.P.* Vvedenie v teoriyu kolebanij [Introduction to the theory of oscillations]. – Moscow: Nauka. – 1964. – 437 p. (Rus.)

9. *Gershuni G.Z.* gidrodinamicheskaya neustojchivost. izotermicheskie techeniya [Hydrodynamic instability. Isothermal flow] // Sorosovskij obrazovatelnyj zhurnal. – 1997. – № 2. – P. 99 – 106. (Rus.)

10. *Zarembo I.K.* Vvedenie v nelinejnyu akustiku [Introduction to nonlinear acoustics]. – Moscow: Nauka. – 1966. – 519 p. (Rus.)

11. *Ginzburg I. P.* Prikladnaya gidrogazodina- mika [Applied fluid dynamics]. – Leningrad.: izd-vo Leningradskogo un-ta. – 1958. – 338 p. (Rus.)

12. *Basok B.I., Gotsulenko V.V.* Raschet parametrov avtoklebaniy v vertikalnoj kamere gorenija vozduxonagrevatelya domennoj pechi pri neustojchivom gorenii [Calculating the parameters of self-oscillations in the vertical combustion chamber of the blast-furnace air heater during unstable combustion] // Teploenergetika. – 2015. – № 1. – P. 59 – 64. (Rus.)

Получено 21.03.2016

Received 21.03.2016

УДК 663.14. 033, 663.143.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ АБСОРБЦИИ КИСЛОРОДА ВОЗДУХА В ФЕРМЕНТАЦИОННОМ АППАРАТЕ С ДИСКРЕТНО-ИМПУЛЬСНЫМ ВВОДОМ ЭНЕРГИИ

Ободович А.Н., д.т.н., Фищенко А.Н., к.т.н., Сидоренко В.В.

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

У статті представлені результати досліджень з впливу обробки поживних середовищ для вирощування дріжджів сахароміцетів методом дискретно-імпульсного введення енергії на швидкість розчинення в них кисню.

В статье представлены результаты исследований по влиянию обработки питательных сред для выращивания дрожжей сахароміцетов методом дискретно-импульсного ввода энергии на скорость растворения в них кислорода.

The article presents the results of studies on the effect of treatment of nutrient media for growing yeast *Saccharomyces cerevisiae* by method of discrete-pulse energy input at the rate of dissolved oxygen.

Библ. 4, рис. 5.

**Ключевые слова:** дрожжерастильный процесс, растворенный кислород, дискретно-импульсный ввод энергии.

Многие микроорганизмы, используемые в промышленности, для роста нуждаются в молекулярном кислороде, который в процессе аэробного дыхания окисляет субстраты до двуокиси углерода и воды [1]. Кроме того, кислород может включаться в процессы конструктивного метаболизма клеток, обеспечивая синтез ими некоторых соединений.

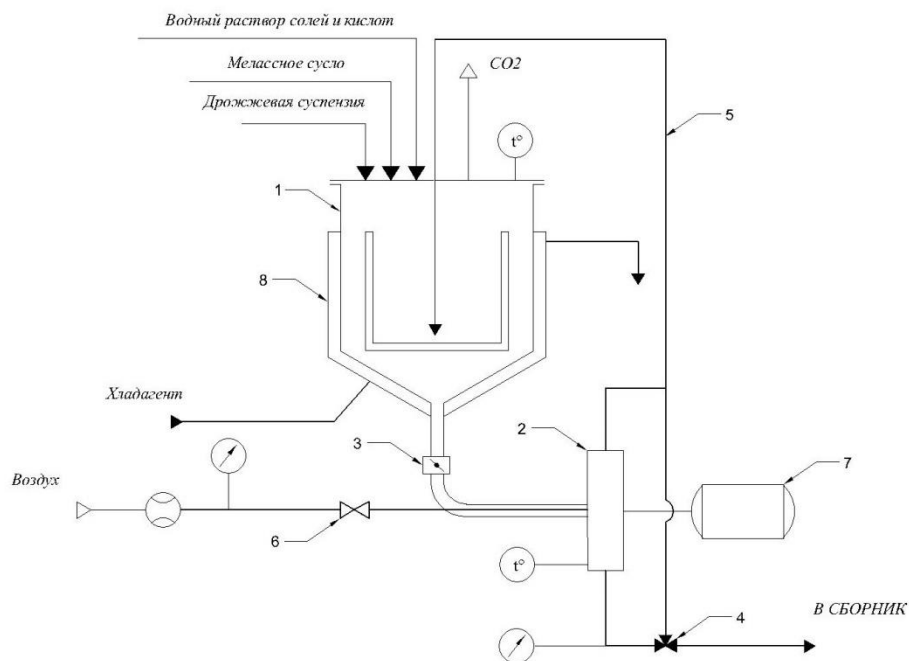
Растворимость кислорода в культуральной среде незначительна и составляет всего несколько граммов кислорода на м<sup>3</sup> [2].

Потребность же аэробных микроорганизмов в кислороде может составлять, десятки килограмм кислорода на м<sup>3</sup> культуральной среды в час. Для обеспечения нормальной жизнедеятельности клеток аэрация среды должна быть непрерывной. Прекращение подачи кислорода даже на 15...20 мин резко понижает скорость роста дрожжей, так как ферментные системы клетки перестраиваются с дыхания на брожение. Съем дрожжей с аппарата снижается, так как переориентирование ферментных систем на синтез биомассы требует много времени [3]. Необходимость постоянного поддержания в среде концентрации растворенного кислорода, при которой не лимитируется аэробный процесс, определяет выбор конструкции и характеристики (главным образом, массообменные) ферментера для каждого конкретного процесса.

С целью интенсификации процесса культивирования микроорганизмов был создан тепло-массообменный аппарат (ферментационная установка с дискретно-импульсным вводом энергии), основным рабочим органом которого является роторно-пульсационный аппарат (РПА), в котором реализуется метод ДИВЭ (рис. 1).

Установка работает следующим образом. В приемный бункер 1 подается мелассное сусло, водный раствор питательных солей и кислот и засевные дрожжи. Затем включают роторно-пульсационный аппарат 2, открывают заслонку 3 и 3-хходовой кран 4, который находится в положении, при котором культуральная среда циркулирует через трубопровод рециркуляции 5 по контуру приёмный бункер – роторно-пульсационный аппарат – приёмный бункер.

Во время рециркуляции смеси открывают 2-хходовой кран, через который, через бактериологический фильтр поступает воздух из атмосферы, за счёт разряжения, создаваемого в приёмном патрубке роторно-пульсационного аппарата. Таким образом смесь культуральной среды и дрожжей насыщается воздухом, который находится в газообразном состоянии. Полученная смесь направляется в рабочую камеру роторно-пульсационного аппарата, где подвергается обработке методом дискретно-импульсного ввода энергии.



**Рис. 1** Аппаратурно – технологическая схема теплообменной установки для культивирования микроорганизмов (на примере культивирования хлебопекарских дрожжей).

1 – бункер; 2 – роторно-пульсационный аппарат; 3 – заслонка; 4 – трёхходовой кран; 5 – трубопровод рециркуляции; 6 – двухходовой кран; 7 – двигатель; 8 – рубашка охлаждения.

При попадании в полость рабочих органов РПА происходит диспергирование смеси пузырьков воздуха в культуральной среде. Вышедшие из рабочей области пузырьки воздуха имеют наноразмеры, что значительно увеличивает поверхность контакта фаз. Кроме того, смесь воздуха и культуральной среды, проходя через РПА, подвергается воздействию высокочастотных пульсаций давления, сильной турбулизации, разрыву сплошности потока, сдвиговых напряжений и т.д.

Роторно-пульсационный аппарат состоит из корпуса с входным и выходным патрубками, системы трубопроводов для рециркуляции или вывода готовой продукции, горизонтального роторно-пульсационного узла, состоящего из двух роторов и одного статора, размещающихся в одном неподвижном стакане. Вращение роторно-пульсационного узла осуществляется с помощью электродвигателя 7. На цилиндрических поверхностях статора и роторов выполнено по 60 сквозных продольных прорезей. Радиальный зазор между рабочими органами ротор – статор – ротор составляет 150...300 мкм. Во время вращения ротора с частотой 1000...5000 мин<sup>-1</sup> по очереди

происходит совмещение пазов статора и роторов, что вызывает значительные перепады давления, высокградиентных течений в зазорах, а также высоких градиентов сдвиговых напряжений. Локальные скорости сдвига потока могут изменяться от  $100 \cdot 10^2$  до  $100 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>, частоты импульсов от 0,1 до 10 кГц. В целях отвода тепла, образующегося вследствие диссипации энергии в рабочей зоне РПА и окисления углеродосодержащих соединений дрожжами, в установке предусмотрена охлаждающая рубашка 8.

Управляя механизмами ДИВЭ и меняя конструктивные особенности РПА можно влиять на процессы массопереноса и абсорбции кислорода воздуха в среде.

Учитывая вышесказанное целью работы было изучение влияния механизмов ДИВЭ на процессы абсорбции и массопереноса кислорода в питательных средах с различной концентрацией сухих веществ.

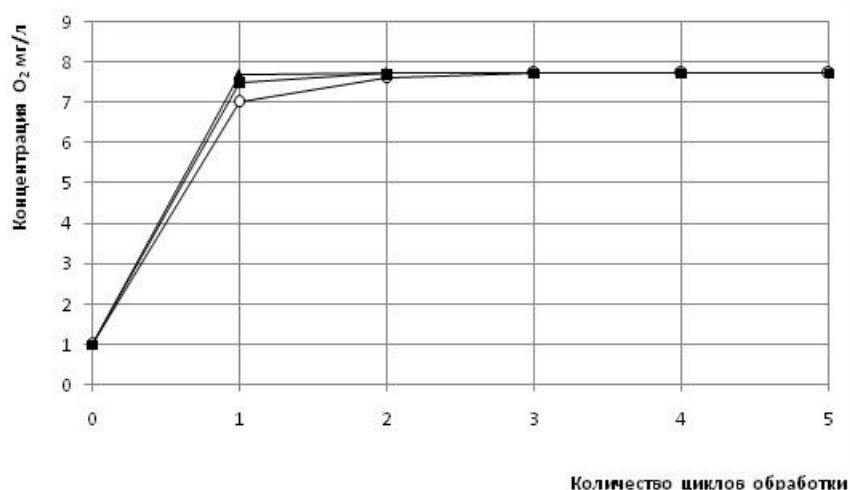
Исследования проводили на питательных средах, применяемых для выращивания дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, используемых в броильном и хлебопекарском производстве.

Исследуемые питательные среды представляют собой водный раствор мелассы с добавлением солей – источников азота, фосфора, магния и калия, подкисленные до pH 5.0. Содержание сухих веществ в этих средах колеблется от десятых долей процента до 10 % [4].

При проведении исследований необходимо было определить зависимость количества растворенного кислорода в воде и питательных средах с различным содержанием сухих веществ от следующих факторов: скорости подачи воздуха, угловой скорости вращения роторного

узла, частоты пульсаций потока, скорости сдвига потока, зазора между статором и роторами, количества циклов обработки.

На первом этапе исследований была изучена зависимость концентрации растворенного в воде кислорода от количества циклов обработки при угловой скорости роторно-пульсационного узла от 38,2 до 52,52 об/мин, представленная на рис. 2. Подача воздуха была постоянной и составляла 0,02 л/л·сек. Концентрация растворенного кислорода осуществлялась йодометрическим методом (Винклера).



**Рис. 2. Зависимость концентрации растворенного кислорода от количества циклов обработки при угловой скорости вращения роторов:**

▲ – 52,52 об/с; ■ – 47,75 об/с; ○ – 38,2 об/с ( кол-во прорезей – 60, зазор – 150 мкм).

Установлено, что с увеличением скорости вращения роторов от 38,2 до 52,52 об/с количество циклов до насыщения воды кислородом (7,74 мг/л) снижается в три раза. Для достижения максимальной концентрации при обработке среды со скоростью вращения роторов 52,52 об/с необходим один цикл, т.е. один проход среды через аппарат, а со скоростью 38,2 об/с – 3 цикла.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что с увеличением угловой скорости вращения роторно-пульсационного узла от 38,2 до 52,52 об/мин достичь необходимой концентрации растворенного в воде кислорода можно за меньшее количество циклов, т.е. с меньшей продолжительностью обработки.

При выращивании дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* используется питательная среда с

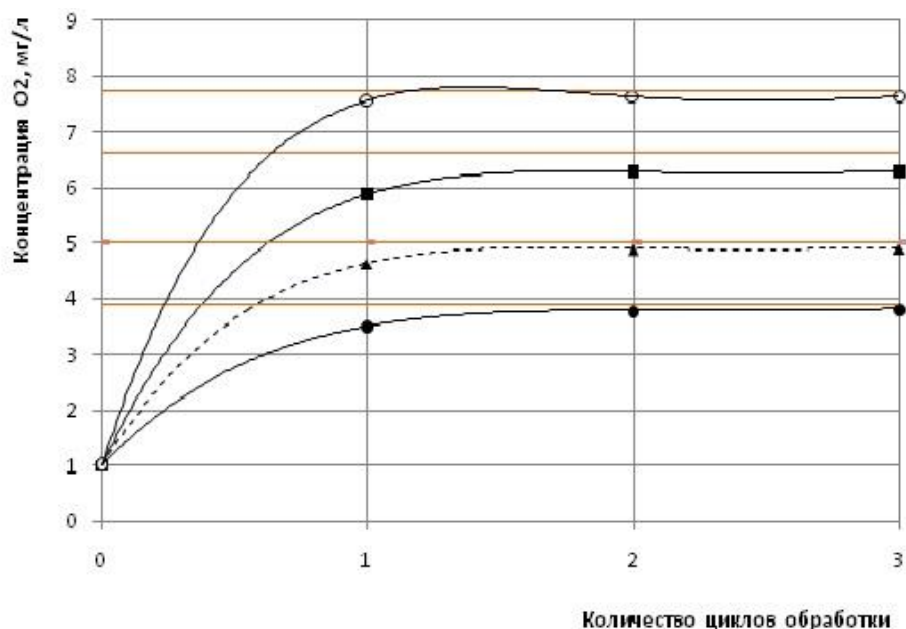
содержанием сухих веществ до 10 %. Поэтому, следующим этапом исследований было определение концентрации растворенного кислорода в вышеуказанных средах в зависимости от количества циклов обработки, при скорости вращения ротора 47,75 об/с. Объем обрабатываемой жидкости составлял 60 л, период одного цикла – 22 сек.

Данные экспериментов представлены на рис. 3.

Анализируя кривые рис. 3 приходим к выводу, что с увеличением концентрации сухих веществ в питательной среде растворимость кислорода уменьшается. Однако, ввиду того, что равновесная концентрация растворенного кислорода в растворах мелассы значительно ниже, чем в воде, для достижения этих значений среду достаточно обрабатывать по 2 цикла.

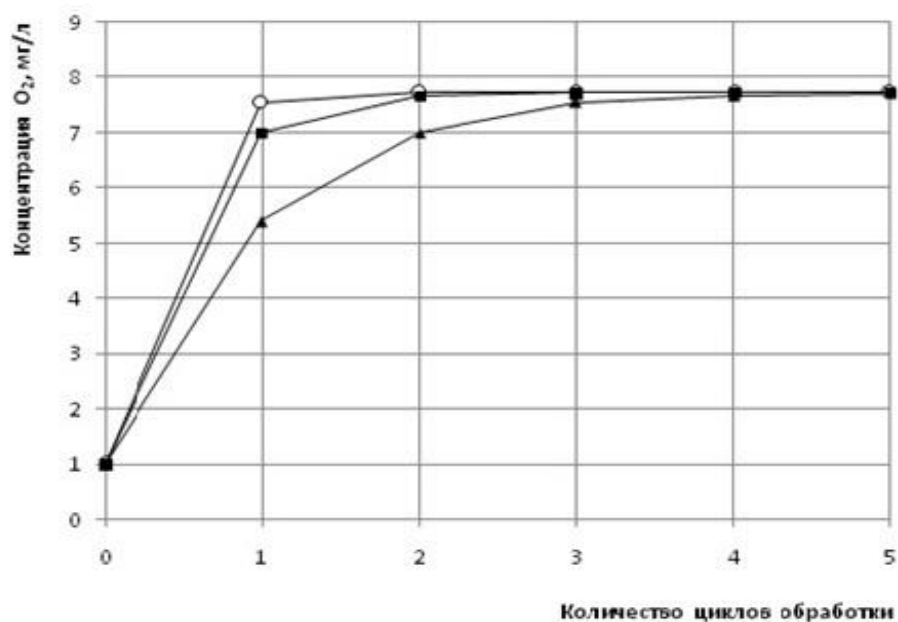
При реализации метода ДИВЭ в РПА одним из основных показателей, влияющих на массоперенос, является частота пульсаций потока. Поэтому в дальнейших исследованиях была изучена зависимость концентрации растворённого

кислорода от частоты пульсаций потока. При проведении эксперимента частоту пульсаций меняли от 2 до 2,865 кГц. Концентрация СВ составляла 10 %. Результаты исследований представлены на рис. 4.



**Рис. 3. Зависимость концентрации растворённого кислорода от количества циклов обработки при различной концентрации СВ:**

○ – вода; ■ – 3 %; ▲ – 5 %; ● – 10 %. ( $n = 47,75$  об/с, кол-во прорезей – 60, зазор – 150 мкм)



**Рис. 4. Зависимость концентрации кислорода от количества циклов обработки при различных частотах пульсаций:**

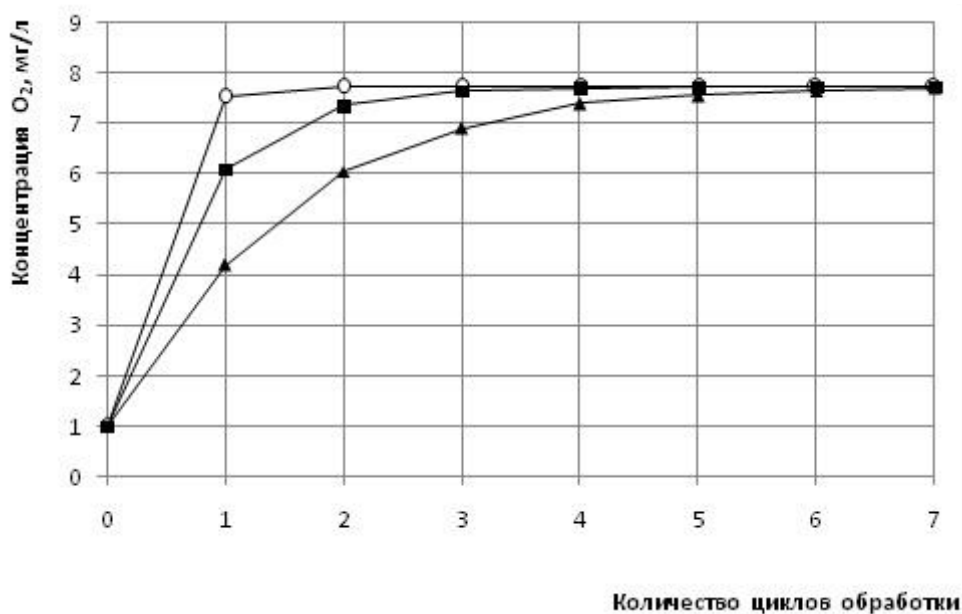
○ – 2,865 кГц; ■ – 2,483 кГц; ▲ – 2 кГц. ( $n = 47,75$  об/с, зазор – 150 мкм).

Из результатов исследований видно, что увеличение частоты пульсаций потока среды в РПА позволяет интенсифицировать процесс растворения кислорода. Равновесная концентрация кислорода при обработке среды с частотой пульсаций 2,86 кГц достигается за 2 цикла, при 2,483 кГц – за 3 цикла, при 2 кГц – за 5 циклов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что увеличение частоты пульсаций среды в РПА позволяет создать развитую поверхность контакта между газовой и жидкой фазами, что благотворно влияет на массоперенос, позво-

ляя сократить продолжительность растворения кислорода [рис. 4].

Взаимосвязь между скоростью потока среды в радиальном направлении РПА и зазора между статором и роторами объединяет величина скорости сдвига потока.

По нашему мнению она также может оказывать влияние на процесс растворения кислорода в питательной среде. На рис. 5 показана зависимость концентрации растворённого в среде кислорода от скорости сдвига потока при концентрации СВ 10 % и угловой скорости 47,75 с<sup>-1</sup>.



**Рис. 5. Зависимость концентрации растворённого кислорода от количества циклов обработки при различных скоростях сдвига потока:**

○ –  $114 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ ; ■ –  $85,5 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ ; ▲ –  $57 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$  ( $n = 47,75 \text{ об/с}$ , кол-во прорезей – 60).

Результаты исследований подтверждают то, что изменение скорости сдвига потока от  $57 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$  до  $114 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$  позволяет сократить количество циклов обработки среды для достижения равновесной концентрации с семи до двух [рис. 5].

Увеличение скорости сдвига потока более  $114 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$  технически довольно сложно, так как это связано с увеличением угловых скоростей и уменьшением зазора между статором и роторами менее 100 мкм.

Проведенные исследования по растворимости кислорода в воде и питательных средах с различной концентрацией СВ в ферментёре с

ДИВЭ позволяет сделать следующие выводы.

- Ферментёр с применением метода ДИВЭ, который осуществляется посредством РПА целесообразно использовать для насыщения питательных сред кислородом.
- Управляя механизмами ДИВЭ и изменяя конструктивные особенности РПА можно влиять на растворимость кислорода в воде и в питательных средах.
- Увеличение угловых скоростей вращения роторов, частоты пульсаций потока и скорости сдвига потока приводит к интенсификации растворения кислорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Промышленная микробиология: Учеб. Пособие для вузов по спец. "Микробиология" и "Биология"*/ З.А. Аркадьева, А.М. Безбородов, И.Н. Блохина и др.; под ред. Н.С. Егорова. – М.: Высшая школа, 1989. – 688 с.
2. *Унифицированные методы анализа вод* / под ред. Ю.Ю. Лурье. – 2-е изд., исправленное. – М.: Химия, 1973. – 376 с.
3. *Производство хлебопекарных дрожжей*/ Н.М.Семихатова, М.Ф. Лозенко, Л.Д. Белова, А.Д. Дмитриев, С.П. Папок – 2-е издание, перераб. и доп. – М.: ВО "Агропромиздат", 1987. – с.272
4. *Бекер М.Е.* Введение в биотехнологию / М.Е. Бекер. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – с. 232

**RESEARCH OF AIR OXIGEN ABSORPTION IN THE FERMENTATION APPARATUS WITH DISCRETE-PULSE INPUT OF ENERGY**

**A. Obodovich, A. Fischenko, V. Sidorenko**

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

The article presents the results of studies on the effect of treatment of nutrient media for growing yeast *Saccharomyces* method of discrete-pulse input energy at the rate of dissolved oxygen. General provisions on the effect of environment on the aeration process of the growth of yeast are covered. The scheme of the fermentation installation and the order of its work is present. The data on the dependence of the rate of dissolved oxygen in the water and nutrient media on the parameters of their

treatment in a rotor-pulsation apparatus.

**Key words:** the process of growing the yeast, dissolved oxygen, discrete-pulse energy input. References 4, figures 5.

1. *Industrial microbiology* / [Z.A. Arkadeva, A.M. Bezborodov, I.N. Blohina at al.]; by edition N.S. Egorov. – М.: Vysshaya shkola, 1989. – 688 p. (Rus)
2. *Standardized methods of analysis of waters* / by ed. Y.Y. Lure. – 2d ed. – М.: Himiya 1973. – 376 p. (Rus)
3. *Production of baker's yeast*/ N.M.Semihatova, M.F. Lozenko, L.D. Belova, A.D. Dmitriev, S.P. Papok – 2d ed. М.: VO "Agropromizdat", 1987. – 272p. (Rus)
4. *Beker M.E.* Introduction to Biotechnology/ V.T. Beker – М.: Pishchevaya promyshlennost, 1978. – 232 p. (Rus)

*Получено 13.01.2016*

*Received 13.01.2016*

УДК 622.278

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ПРИ ПОДЗЕМНОМ СЖИГАНИИ УГЛЯ

Садовенко И.А., докт. техн. наук, Инкин А.В., канд. техн. наук

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» МОН Украины,  
пр. К. Маркса 19, Днепрпетровск, 49600, Украина

За результатами моделювання фільтрації і теплоперенесення встановлена конвективна і кондуктивна складова теплового потоку, що проникає з підземного газогенератора у вищезалегаючий водоносний горизонт. Дані оцінки зміни величини потоку і температури підземних вод в залежності від потужності водотривкого шару.

По результатам моделирования фильтрации и теплопереноса установлена конвективная и кондуктивная составляющая теплового потока, проникающего из подземного газогенератора в выщезалегающий водоносный горизонт. Даны оценки изменения величины потока и температуры подземных вод в зависимости от мощности водоупорного слоя.

As a result of filtration and heat transfer modeling of convective and conductive installed component of the heat flux penetrating the underground gasifier in the upper aquifer. The estimates varying the flow and temperature of groundwater, depending on the capacity impermeable layer deterioration.

Библ. 9, рис. 5.

**Ключевые слова:** подземное сжигание угля, тепловая энергия, подземные воды.

$a$  – коэффициент температуропроводности;  
 $C$  – содержание;  
 $c$  – теплоемкость;  
 $D$  – расход дутья;  
 $F$  – площадь;  
 $H$  – глубина залегания газогенератора;  
 $l$  – длина;  
 $P$  – давление;  
 $Q$  – теплота сгорания;  
 $q$  – тепловой поток;  
 $S$  – площадь теплообмена;  
 $T$  – температура;  
 $t$  – время;  
 $V$  – количество;  
 $W$  – влажность;  
 $z$  – вертикальная координата;  
 $\alpha$  – опытный коэффициент;  
 $k$  – проницаемость;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $\mu$  – вязкость;

$\rho$  – плотность;  
 $\vartheta$  – объемный поток;  
 $O$  – дебит;  
 $\Pi$  – производительность подземного газогенератора;  
 $\mathcal{E}$  – эффективность канала газификации;

### Индексы нижние:

$cd$  – кондуктивный;  
 $cv$  – конвективный;  
 $o$  – суммарный;  
 $sk$  – скважина;  
 $атм$  – атмосферное;  
 $в$  – воздух;  
 $г$  – газ;  
 $п$  – пород;  
 $пв$  – подземные воды;  
 $у$  – уголь;  
 $уг$  – углерод;  
 $уг. комп.$  – углесодержащие компоненты;  
 $уп$  – угольный пласт.

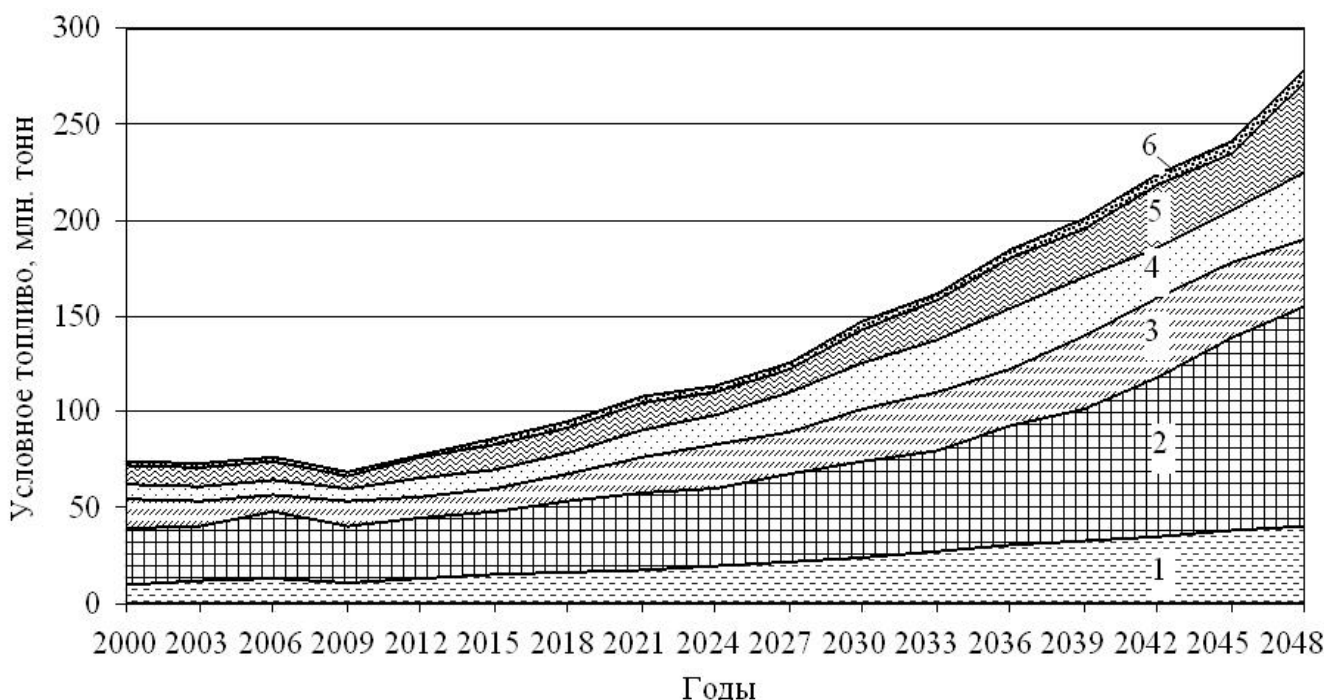
### Введение

По оценкам ведущих нефтегазовых компаний, начало XXI века ознаменовалось значительным увеличением доли угля в топливно-энер-

гетическом балансе Украины и ряда стран мира (рис. 1). Рост его потребления был вызван, с одной стороны, ограниченностью запасов нефти и природного газа, а также перемещением разрабаты-

ваемых месторождений в труднодоступные районы, с другой стороны, проблемами безопасности атомных электростанций и высокими затратами на захоронение радиоактивных отходов [1]. Вместе с тем, увеличение добычи и переработки угля традиционными способами привело к превращению угледобывающих регионов в зоны экологического бедствия. Так, работа небольшой угольной электростанции мощностью 200 МВт сопровождается ежегодным выбросом в атмосферу 100 тыс. т твердых частиц, 15 тыс. т сернистых соединений и 2 тыс. т окислов азота.

Расширение сферы использования угольных ресурсов возможно путем их преобразования на месте залегания в экологически более чистый газообразный энергоноситель. Наиболее технически освоенным процессом такой переработки является подземное сжигание угля (ПСУ). Однако, несмотря на почти вековой научно-промышленный опыт развития, оно до сих пор не получило широкого распространения ввиду значительного рассеивания вырабатываемой тепловой энергии в породном массиве [2].



**Рис. 1. Прогноз потребления энергии Украиной за счет:**  
1 – 6 топливных масел, природного газа, теплоносителей, электричества, угля и биомассы соответственно.

#### **Постановка задачи**

Для повышения КПД данной геотехнологии (отношение используемого тепла к теплоте сгорания топлива) в работе [3] уже была установлена возможность отбора части тепловой энергии поступающей из реакционного канала в покрывающие его породы. Кроме того, об этом свидетельствуют результаты крупнейшего научно-промышленного эксперимента по ПСУ на участке Роки Маунтин в США [4]. Однако для практических расчетов количества и выбора рациональной схемы извлече-

ния накапливаемой тепловой энергии необходима детальная характеристика возникающего теплового потока и оценка влияния на него горно-геологических условий разрабатываемого угольного участка. В связи с чем, целью данной работы является установление динамики формирования теплового поля вокруг подземного газогенератора и возможности отбора нагреваемых им подземных вод для теплоснабжения гражданских и промышленных объектов.

Подготовка угольного участка к подземному

сжиганию начинается с бурения нагнетательной и газоотводящей скважины. Для взаимодействия угля с дутьем в пласте между скважинами создается реакционный канал, при образовании которого применяют фильтрационную, гидроразрывную, электрическую и буровую сбойки. После сбойки скважин происходит поджиг угля и подача химических реагентов (воздуха, кислорода или водяного пара) в виде дутья через нагнетательную скважину. Участок угольного пласта, где ведется сжигание (подземный газогенератор), условно можно разделить на четыре зоны, которым соответствуют различные реакции горения, и на которых основан процесс ПСУ (рис. 2). Образованный в результате горения газ по продуктивной скважине выводится на поверхность и через трубопровод попадает в установки для охлаждения и очистки. Утилизация его физического тепла производится в теплообменниках, работающих в широких диапазонах: высоко (800...600 °C), средне (600...400 °C) и низкотемпературном (400...150 °C).

Согласно приведенной технологической схеме разработки и геологического строения угольных месторождений теплообменная система подземного газогенератора состоит из трёх пластов, имеющих непосредственный контакт друг с другом. В процессе сжигания нижнего угольного пласта часть тепла расходуется для перехода в горючие компоненты, другая часть поступает во вмещающие породы. Так как нагретые продукты горения значительно легче дутьевых компонентов, подающихся в реакционный канал, то при сжигании они будут занимать верхнюю часть выгазованного пространства, создавая там наиболее высокую температуру. Таким образом, почва водоупора над угольным пластом подвергается наибольшему термическому воздействию. Этот пласт прогревается над реакционным каналом в период сжигания угля и остывает после прекращения дутья. Водоносный пласт сверху нагревается под воздействием теплового потока, проходящего через кровлю нижележащего водоупора.

### *Математическая модель.*

В оценке геотехнологии важно определить долю тепловой энергии, поступающей через водоупор в водоносный пласт, которую возможно

отобрать путём откачки нагретой воды. При этом интенсивность подогрева подземных вод и мощность теплового потока напрямую зависят от объема саженого угля, и следовательно, от дутья, поданного в реакционный канал. Необходимое количество воздуха ( $m^3$ ) для газификации 1 кг угля определяется по эмпирическому соотношению [5]:

$$V_B = \alpha \frac{0,001 Q_y + 25,1 W_y}{418}. \quad (1)$$

Производительность подземного газогенератора характеризуется объемом отработанного угля за определенный промежуток времени, и может быть записана в следующем виде

$$\Pi = \frac{D}{V_B \cdot \rho_y}. \quad (2)$$

Выход газа с 1 кг угля составит

$$V_{\Gamma} = \frac{1}{V_y}, V_y = \frac{12 \sum C_{\text{уг.комп.}}}{22,4 \cdot C_{\text{уг}}}, \quad (3)$$

$$\sum C_{\text{уг.комп.}} = \%CO_2 + \%CO + \%CH_4.$$

Принудительное нагнетание в газогенератор дутья дополнительно создаст вертикальный градиент давления, являющийся основной причиной конвекции в покрывающих породах [6]. При этом суммарный тепловой поток идущий от канала газификации на нагрев водоупора будет равен

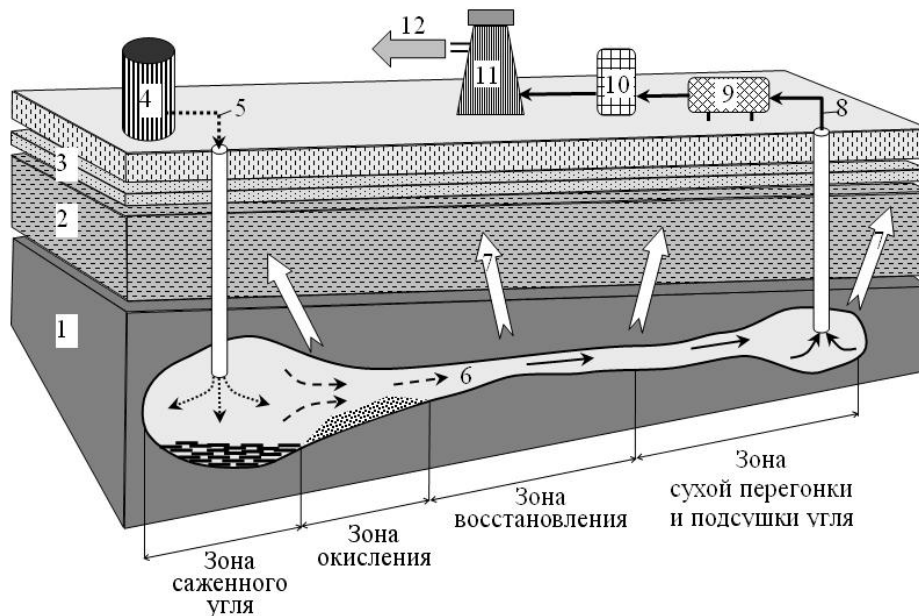
$$q_0(t) = q_{cd}(t) + q_{cv}(t). \quad (4)$$

Считаем, что теплофизические свойства пород водоупора не зависят от водообмена в вышележащем пласте.

Площади конвективного и кондуктивного теплообмена изменяются с течением времени по мере развития реакционного канала и сжигания угля. Согласно данным вскрытия подземных газогенераторов на Шахтинской и Лисичанской станциях "Подземгаз", теплофизические и геометрические параметры канала не постоянны, а связь между пустотами в нем носит местный и ограниченный характер [7]. Это связано с тем, что первоначально созданный канал в процессе газификации постоянно расширяется, приближаясь к кровле и подошве угольного

пласта. В результате этого в выгазованное пространство попадают не только угольные, но и породные стенки. Далее сечение канала продолжает увеличиваться и, достигнув предельных

величин, уменьшается вследствие обрушения породной кровли. Затем картина изменения сечения канала повторяется вновь.



**Рис. 2. Горно-энергетический модуль подземного сжигания угля:**

**1 – угольный пласт; 2 – водоупорные породы; 3 – водоносный горизонт; 4 – компрессор; 5 – дутье; 6 – подземный газотеплогенератор; 7 – тепловой поток в покрывающие породы; 8 – продуктивный газ, 9, 10 – соответственно оборудование для механической и химической очистки газа; 11 – теплообменник; 12 – тепловая энергия.**

Учитывая, что в горно-геологических условиях угольных месторождений Украины сжиганию подвергаются пласты мощностью менее 1 м, реакционный канал относительно быстро достигнет их кровли и подошвы. Дальнейшее развитие выгазованного пространства будет происходить по всей мощности пласта в ширину. Его площадь может быть осреднена по времени с учетом удельной эффективности работы канала газификации [8].

$$\Theta = \frac{F_{уп}}{l_{уп}}.$$

Конвективный тепловой поток, поступающий через водоупор в водоносный горизонт, определяется по формуле

$$q_{cv} = g_T c_T \rho_T (T_T - T_{пв}), \quad g_T = \frac{\kappa_{п}}{\mu_T} \cdot \frac{P_T^2 - P_{атм}^2}{2P_{атм} \cdot H} \cdot S_{cv}. \quad (5)$$

Принимается, что давление газа одинаково в объеме полости. При высокой скорости филь-

трации газа, достигающей нескольких мм/с, конвективный тепловой поток в течение суток поступает в водоносный горизонт. При этом нагревается небольшой объем вокруг трещин, а основная масса пород водоупора прогревается вследствие кондуктивного переноса тепла.

Пусть  $\chi = q_{cv}/q_o$  – доля конвективного потока в общем потоке тепла через водоупор. Оставшаяся часть тепла  $(1 - \chi) q_o$  поступает в вышележащие породы кондуктивным путем. Оценки показывают, что  $\chi$  не превышает несколько процентов даже при значительном увеличении проницаемости водоупора.

Кондуктивный поток тепла поступает в водоупор на разных участках по мере продвижения огневого забоя. В соответствии с принятой дискретизацией времени на всех участках подошвы водоупора над газогенератором в численных расчетах задается тепловой поток,

соответствующий среднесуточному значению  $q_{cd}$ , причем для всех моментов времени  $q_{cd} = (1 - \chi)q_0$ .

Кондуктивный тепловой поток пространственно распределяется по подошве водоупора. Для каждого  $j$ -го участка, где происходило поступление тепла с момента  $t_i$ ,  $q_{cd}$  можно задать ограничения:

$$q_{cdj} = \begin{cases} q_j, & t_i < t < t_{i+1}, \\ 0 & t < t_i, t > t_{i+1}. \end{cases} \quad (6)$$

Температура в слое водоупора над каждым участком суточного поступления тепла рассчитывается по формуле

$$T_j(z, t) = T_o + q_j(T(z, t) - T(z, t - t_s)), \quad (7)$$

$$T(z, t) = \frac{2}{\lambda_{\Pi}} \sqrt{a_{\Pi}} t \operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{a_{\Pi}} t}. \quad (8)$$

Формула (8) представляет собой аналитическое решение уравнения теплопроводности в однородной полуограниченной области, на границе которой задан постоянный единичный тепловой поток [7].

Тепловой поток на кровле водоупора можно определить по формуле

$$q_{cd,w}(t) = S_{cd} \lambda_{\Pi} \cdot \left. \frac{\partial T(t)}{\partial z} \right|_{z=m_0}. \quad (9)$$

Суммирование выражений (9) по всем участкам пространственной дискретизации определяет общий кондуктивный поток, поступающий в пласт.

Расчет теплового потока с использованием решения (8) несколько занижает реальное поступление тепла в проницаемый пласт. Фактически отбор тепла фильтрационным потоком снизит температуру на подошве пласта и увеличит отток тепла из водоупора. Однако этот эффект будет незначительным ввиду небольшой разницы, температур нагретой воды и ее фоновой (естественной) температуры в пласте.

Отбор тепла, поступающего в водоносный горизонт, возможен через откачивающую скважину, расположенную в водоносном пласте вблизи канала газификации. Предположим, что весь поток условно мгновенно затрачивается на нагрев воды поступающей в скважину, и она сразу же удаляется из пласта. Тогда температура воды в скважине может быть рассчитана

по формуле

$$T_{sk}(t) = T_{\PiВ} + \frac{q_{cd}(t) + q_{cv}(t)}{c_{\PiВ} \rho_{\PiВ} O_{sk}(t)}. \quad (10)$$

Более точная оценка величины  $T_{sk}$  может быть дана на основе численного моделирования теплопереноса в проницаемом пласте с учетом вертикального расположения скважины и динамики поступления тепла.

### Метод решения и исходные данные.

Сопоставительные расчеты по формулам (1) – (10) были выполнены в программной среде Mathcad для горно-геологических условий участка «Ольхово нижнее», расположенного в пределах Чистяково-Снежнянского угленосного района Донецкого бассейна. Каменноугольные отложения данной территории представлены смоляниновской свитой ( $C_2^3$ ), в разрезе которой между отрабатываемыми угольными пластами  $h_8$  и  $h_{11}$  развиты несколько нерабочих угольных пластов ( $h_9, h_{10}^n, h_{10}^1$ ) с углами падения от 10 до 30° [9]. Данные пласты имеют простое строение, повсеместное распространение в пределах выделенного участка и относятся к антрацитам. Для свиты  $C_2^3$  характерно развитие обводненной толщи «бабаковских» песчаников  $h_{10}Sh_{11}$  мощностью 50...60 м, залегающих выше угольного пласта  $h_{10}^1$ . В пределах этой толщи подземные воды имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав с минерализацией до 3 г/л и не используются для питьевого водоснабжения. Учитывая требования, предъявляемые к угольным пластам, отрабатываемым способом ПСУ [2, 5] и фактические данные о строении участка, можно считать, что на данной территории оптимальным будет разработка угольного пласта  $h_{10}^1$  с использованием в качестве теплоносителя воды песчаников  $h_{10}Sh_{11}$ .

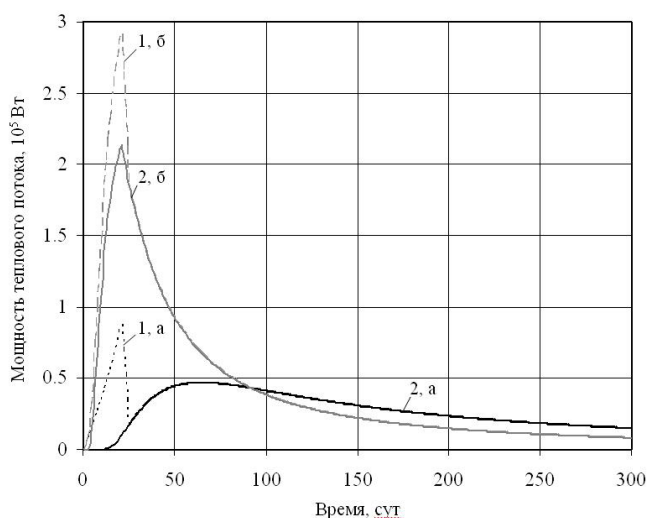
Теплофизические свойства и геотехнологические параметры ПСУ принимались следующими:  $\alpha = 1,1$ ;  $Q_v = 15$  МДж/кг;  $W_y = 35$  %;  $\rho_r = 1,1$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_y = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\sum C_{y, \text{компл}} = 39$  %;  $C_{y, \text{уг}} = 65$  %;  $c_r = 1000$  Дж/кг·°C;  $\mu_r = 1,79 \cdot 10^{-5}$  кг/м·с;  $T_r = 900$  °C;  $\kappa = 10...14$  м<sup>2</sup>;  $P_{\text{атм}} = 0,102$  МПа;  $\lambda_{\Pi} = 2,5$  Вт/м·°C;  $T_{\PiВ} = 15$  °C;  $c_{\PiВ} = 4100$  Дж/кг·°C;  $\rho_{\PiВ} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $H = 200$  м;  $P_r = 3$  МПа;  $t = 20$  сут;  $D = 1800$  м<sup>3</sup>/час. Площадь теплообмена задавалась как объем выгазованного пространства

при мощности угольного пласта один метр. Тепловой поток, поступающий в породы кровли подземного газогенератора, определялся как разность между теплотой сгорания угля и теплом заключенным в вырабатываемом при этом газе ( $Q_r = 3,33 \text{ МДж/м}^3$ ). Расчеты проводились с шагом по времени в одни сутки.

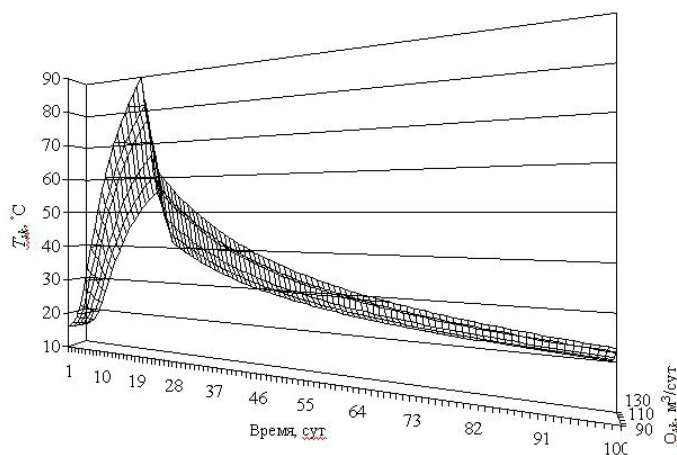
### Результаты моделирования.

На рис. 3 – 4 приведены результаты расчета суммарного теплового потока поступающего в вышележащий водоносный горизонт и температуры насыщающих его подземных вод в процессе сжигания угольного пласта. Кривые (а) и

(б) получены при различных мощностях водоупора. Анализ показывает, что с увеличением размеров разделяющего слоя количество тепла проникающего в водоносный пласт уменьшается, что очевидно, но доля конвективной составляющей в общем потоке тепла возрастает с 6,5 до 9,3 % при увеличении мощности водоупора с 3 до 7 м соответственно. Температура откачиваемых подземных вод в период сжигания угля доходит до  $90^\circ\text{C}$  и уменьшается с увеличением дебита скважины и мощности водоупорных пород. После прекращения процесса сжигания угля она резко снижается и достигает своих начальных значений спустя 100 сут.



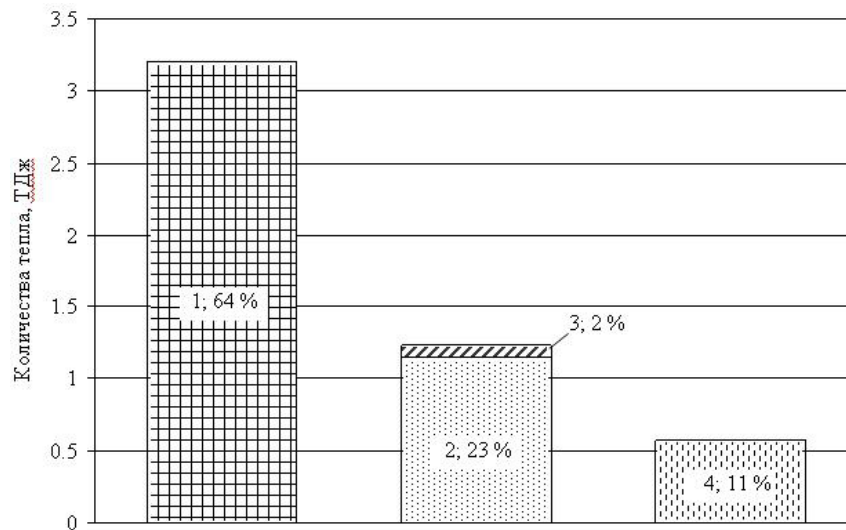
**Рис. 3. Изменение конвективной (1) и кондуктивной (2) составляющей теплового потока, поступающего в водоносный горизонт при подземном сжигании угольного пласта с водоупорными породами мощностью 7 (а) и 3 м (б).**



**Рис. 4. Изменение температуры подземных вод, отбираемых скважиной из водоносного пласта, залегающего над подземным газогенератором.**

На рис. 5 представлен тепловой баланс ПСУ. Анализ диаграмм показывает, что большая часть (64 %) тепла сжигаемого топлива содержится в вырабатываемом газе. На долю физического тепла (попадающего в горный массив) приходятся оставшиеся 36 %. В водоносный горизонт, в зависимости от мощности водоупора (3...7 м), поступает от 18 до 25 % выделяющейся в про-

цессе сжигания тепловой энергии. Остальное физическое тепло поглощается вмещающими породами. Отбор нагретых вод из водоносного пласта позволяет использовать аккумулирующуюся в водоносных породах тепловую энергию и тем самым повысить КПД процесса подземного сжигания до 85 %.



**Рис. 5. Баланс тепловой энергии при подземном сжигании некондиционного угольного пласта участка «Ольхово нижнее»:**

**1 – химическое тепло, заключенное в газе ПСУ; 2 – 3 – тепло, поступающее в водоносный горизонт кондуктивным и конвективным путем соответственно;**  
**4 – физическое тепло, поглощенное породным массивом.**

**Цифрами показана доля тепла от общей теплоты сгорания топлива в процентах.**

### **Выводы.**

Разработана модель теплопереноса в породах кровли подземного газогенератора при сжигании угольного пласта. Используемые при тестировании модели горно-геологические и теплофизические параметры соответствуют условиям реального угольного участка, пригодного для отработки способом подземного сжигания. Выполненные расчеты позволили оценить роль конвективной и кондуктивной составляющей теплового потока в нагреве подземных вод вышележащего водоносного горизонта. По результатам моделирования установлены количественные показатели уменьшения величины потока и температуры подземных вод с увеличением мощности водоупорно-

го слоя и дебита эксплуатационной скважины. Тепловой баланс ПСУ показал, что в водоносном пласте накапливается от 18 до 25 % тепла, выделяющегося при сжигании угля. Это позволяет существенно нагреть (до 90 °С) насыщающие его подземные воды, использовать их для теплоснабжения зданий и повысить КПД подземного сжигания до 85 %.

Дальнейшее развитие данной модели целесообразно путем повышения ее адекватности реальной геотехнологической схеме, которая предполагает одновременную закачку и отбор воды разной температуры через систему нескольких скважин. Кроме того, необходима оценка экономической эффективности использования тепловой энергии водоносных горизонтов при ПСУ на основе результатов моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тополов В.С.* Угольная отрасль Украины: энергоресурсы, ретроспектива, состояние, проблемы и стратегия развития / В.С.Тополов, Б.А.Грядущий, С.Я.Петренко. – Д.: ООО «Алан», 2005. – 408 с.
2. *Крейнин Е.В.* Нетрадиционные термические методы добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье / Е.В. Крейнин. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. – 302 с.
3. *Садовенко И.А.* Миграция и теплоперенос вокруг подземного газогенератора: Монографія / И.А. Садовенко, А.В. Инкин, С.В. Жолудев. – Дніпропетровськ: «Грани», 2012. – 282 с.
4. *Lindblom S.R.* Rocky Mountain 1 Underground Coal Gasification Test Hanna, Wyoming Groundwater Evaluation. Final Report June 10, 1988 - June 30, 1993 / S.R. Lindblom, V.E. Smith. – 1993. – 84 p.
5. *Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля:* Монография / [под. ред. О.В. Колоколова]. – Днепропетровск: НГА Украины, 2000. – 281 с.
6. *Аренс В.Ж.* Контроль и управление процессом подземной газификации угля / В.Ж. Аренс, И.М. Бирман // Геотехнология топливно-энергетических ресурсов: Сб. науч. тр. – К.: Наук. Думка, 1986. – С. 220 – 230.
7. *Ариненков Д.М.* Подземная газификация угля / Д.М. Ариненков, Л.М. Маркман. – Сталино: Сталино-Донбасс, 1960. – 96 с.
8. *Гончаров С.А.* Термодинамика: Учебник / Гончаров С.А. – М: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. – 440 с.
9. *Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 1. Угольные бассейны и месторождения юга Европейской части СССР* / [Лагутина В.В., Левенштейн М.Л., Попов В.С. и др.]; под ред. И.А. Кузнецова. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 1210 с.

## PROSPECTS OF USE OF THERMAL ENERGY IN AQUIFERS UNDERGROUND BURNING OF COAL

**Sadovenko I.A., Inkin A.V.**

State HEI «National Mining University» of the Ministry of education and science of Ukraine, Karl Marx Av., 19, Dnipropetrovs'k, 49600, Ukraine

**Key words:** underground coal combustion, thermal energy, underground water.

**Purpose.** Installing the dynamics of formation of a thermal field around underground gas generator and the possibility of withdrawal of ground water are heated to heat buildings.

**Methods.** Developed and applied methods based on numerical modeling of convective and conductive heat flow component that penetrates from the reaction channel in the aquifer which lies above. Verification of the model made for the geological conditions of the site «Olho bottom», located within Chistyakovo-Snizhne carboniferous region Donetsk basin.

**Results.** The estimates varying the heat flux and temperature in groundwater depending on capacity impermeable layer deterioration. Based on numerical analysis found that by the end of working coal aquifers in the array can accumulate more than 60 % of the heat that enters the host rocks. The selection of the heated water will enhance the efficiency of POC to 85 %.

References 9, figures 5.

1. *Topolov V.S.* The Ukrainian coal sector: energy, retrospection, status, problems and development strategy / V.S.Topolov, B.A.Gryaduschiy, S.Ya.Petrenko.— Donetsk: ООО «Alan», 2005. – 408 p. (Rus.)

2. *Kreinin E.V.* Unconventional thermal methods of extraction of unconventional fuels: coal, hydrocarbons / E.V. Kreinin. – Moscow: ООО «IDC Gazprom», 2004. – 302 p. (Rus.)

3. *Sadovenko I.A.* Migration and heat transfer around underground gas generator: Monograph / I.A. Sadovenko, A.V. Inkin, S.V. Zholudev. – Dnipropetrovs'k: «Grani», 2012. – 282 p. (Rus.)

4. *Lindblom S.R.* Rocky Mountain 1 Underground Coal Gasification Test Hanna, Wyoming Groundwater Evaluation. Final Report June 10, 1988 - June 30, 1993 / S.R. Lindblom, V.E. Smith. – 1993. – 84 p. (En.)

5. *Theory and practice of thermo-chemical technology of booty and processing of coal:* Monograph/[ed.O.V.Kolokolov].—Dnipropetrovs'k: Natsionalnaya gornaya akademiya Ukrainyi, 2000. – 281 p. (Rus.)

6. *Ahrens V.Zh.* The control and management of the process of underground coal gasification / V.Zh. Arens, I.M. Birman // *Geotekhnologiya toplivno-energeticheskikh resursov: Sb. nauch. tr.* – Kiev: Nauk. Dumka, 1986. – P. 220 – 230. (Rus.)

7. *Arinenkov D.M.* Underground coal gasification / D.M. Arinenkov, L.M. Markman. – Stalino: Stalino-Donbass, 1960. – 96 p. (Rus.)

8. *Goncharov S.A.* Thermodynamics: Tutorial / Goncharov S.A. – Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2002. – 440 p. (Rus.)

9. *Geology of deposits of coal and pyroshales of the USSR. Vol. 1. Coal pools and deposits of south of European part of the USSR* / [Lagutina V.V., Levenshteyn M.L. and Popov V.S.]; ed. I.A. Kuznetsov. – Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1963. – 1210 p. (Rus.)

*Получено 11.01.2016*

*Received 11.01.2016*

УДК 662.76

## ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОГО ПІРОЛІЗУ БІОМАСИ В АБЛЯЦІЙНОМУ ШНЕКОВОМУ РЕАКТОРІ

**Клименко В.М.<sup>1</sup>**, чл.-кор. НАН України, **Баштовий А.І.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Зубенко В.І.<sup>1</sup>**,  
**Антощук Т.О.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

<sup>2</sup>НТЦ "Біомаса", вул. Желябова, 2а, Київ, 03067, Україна

Представлено результати експериментальних досліджень процесу швидкого піролізу біомаси з метою отримання біонафти, вуглецевого залишку та піролізного газу в абляційному реакторі шнекового типу. Запропоновано та реалізовано заходи щодо вдосконалення технології піролізу. Проведено порівняльний аналіз даних експерименту з даними іноземних авторів.

Представлено результати експериментальних досліджень процесу швидкого піролізу біомаси з метою отримання біонефти, вуглецистого залишку та піролізного газу в абляційному реакторі шнекового типу. Проведен їх порівняльний аналіз з іноземними аналогами. Предложено мероприятия по дальнейшему усовершенствованию данной технологии.

The paper presents results of experimental investigations of fast pyrolysis of biomass in the ablative screw reactor to obtain bio-oil, carbonaceous residue and pyrolysis gas. Their comparative analysis with foreign similar experimental data was carried out. The measures to further development of this technology were suggested.

Бібл. 9, рис. 1, табл. 4.

З інформаційних джерел та оцінок Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) [1] відомо, що рідке біопаливо є одним з перспективних видів органічного рідкого альтернативного палива. Рідке біопаливо можна отримати з альтернативних видів палива, а саме з біомаси, шляхом термічної переробки, процесом піролізу [2-3].

Відповідно до оцінок МЕА, а також до стандартів виробництва рідкого біопалива, не кожний вид процесу піролізу може відповідати екологічним критеріям виробництва. Також слід зазначити, що піроліз спрямований не лише на отримання рідкого біопалива (біонафти), а й на виробництво піролізного газу. У випадку застосування досконаліших технологій, у технологічному процесі можна отримувати якісний вуглецевий залишок, який може бути використаний для виробництва твердого біопалива.

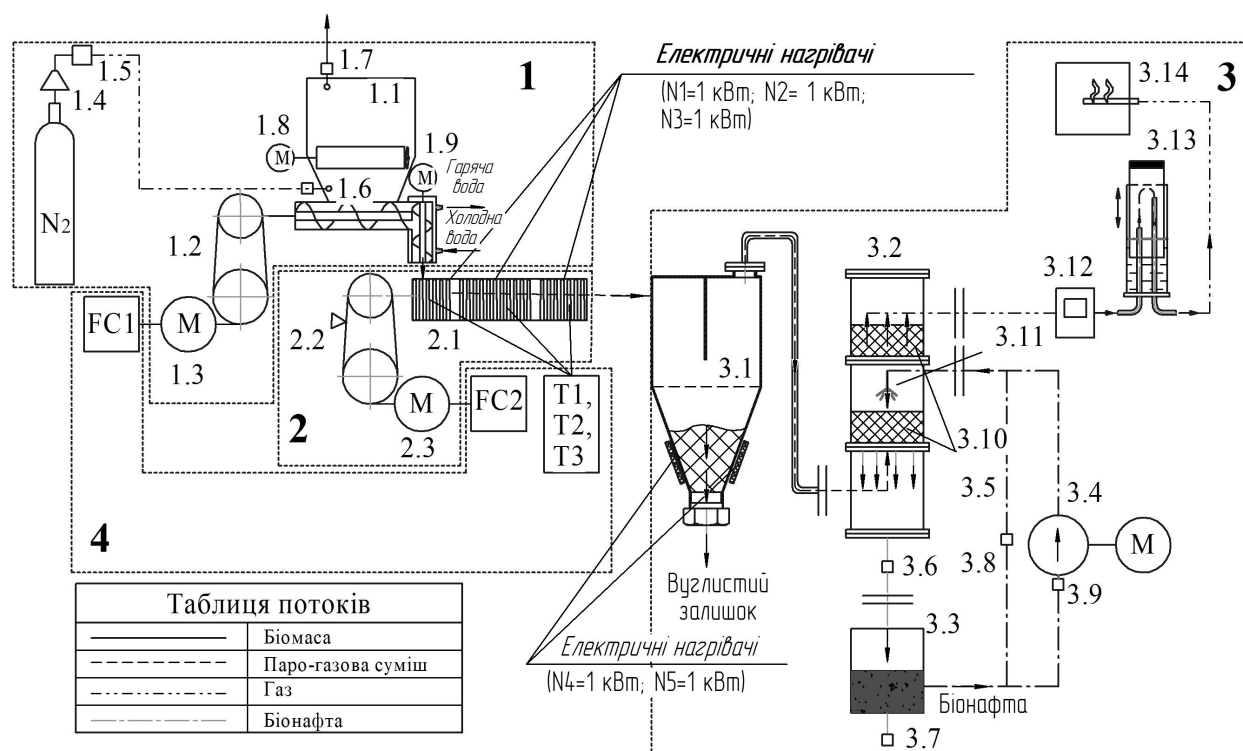
Мета даного дослідження полягає в удосконаленні роботи експериментальної установки швидкого абляційного піролізу біомаси, розробленої в ІТТФ НАНУ та порівнянні даних

експерименту із даними іноземних авторів [4,5].

У роботі [6] були представлені результати експериментів на установці швидкого піролізу. Представлена установка мала ряд конструктивних недоліків, а характеристики отриманих продуктів піролізу мали досить низькі показники. Щоб подолати виявлені недоліки, попередня конструкція установки була модифікована (рис. 1). Основна модифікація полягала у зміні конструкції абляційного реактора з метою забезпечення необхідного температурного режиму окремо для різних зон реактора:

- 1) зона нагріву часток біомаси до необхідної температури;
- 2) зона проведення піролізного процесу;
- 3) зона видалення продуктів піролізної реакції.

Проведені експерименти показали, що завдяки визначенню оптимальних умов роботи лабораторної установки вдалося досягти тривалості стабільної роботи установки на рівні 180 хв. та постійного виходу біонафти на рівні до 50 % мас.



**Рис. 1. Технологічна схема лабораторної установки швидкого піролізу біомаси:**  
**1** – система подачі сировини, **1.1** – шнековий живильник сировини з бункером;  
**1.2** – клиноремінна передача приводу шнеку живильника, **1.3** – двигун-редуктор,  
**1.4** – газовий редуктор, **1.5** – регулятор витрати газу, **1.6**, **1.7** – крани;  
**1.8** – двигун-редуктор приводу мішалки бункера;  
**1.9** – двигун-редуктор приводу шнека вертикального патрубку;  
**2** – реакторний блок, **2.1** – реактор зі шнеком,  
**2.2** – клиноремінна передача приводу шнеку реактора, **2.3** – електродвигун;  
**3** – система парогазоочистки та утилізації піролізних газів, **3.1** – осаджувальна камера,  
**3.2** – скруббер, **3.3** – бак для збору біонафти, **3.4** – насос,  
**3.5** – байпас (для регулювання швидкості подачі охолоджувальної рідини насосом),  
**3.6** – **3.9** – вентиля запірні, **3.10** – кільця Рашига; **3.11** – форсунка;  
**3.12** – лічильник витрат піролізного газу, **3.13** – газгольдер,  
**3.14** – пальник для спалювання піролізного газу; **4** – блок живлення та керування.

Аналіз [5, 7, 8] показав, що конструкції абляційних реакторів швидкого піролізу для лабораторних досліджень досить подібні, а основні відмінності полягають у загальному виконанні та автоматизації даних установок, а також у використанні приладів, що вимірюють основні показники та параметри їх роботи.

Принципову схему експериментальної установки, розробленої в ІТТФ НАНУ, представлено на рис. 1. На зовнішній поверхні реактора розташовані три електричні нагрівачі

потужністю 1 кВт кожен. Управління нагрівачами реактора здійснюється за сигналом термодатчиків, що закріплені на зовнішній поверхні корпусу реактора за допомогою мікропроцесорного регулятора температури. Максимальна температура реактора, яку може забезпечити нагрівач, становить 650 °С. Для запобігання втрат тепла у навколишнє середовище корпус реактора покритий теплоізоляційними матеріалами.

Шнек реактора приводиться в дію за допомогою електродвигуна змінного струму та ре-

дуктора. Частота обертання електродвигуна регулюється струмом частотою від 10 до 57,5 Гц за допомогою силового перетворювача частоти, що дозволяє змінювати швидкість переміщення часток біомаси відносно корпусу реактора.

Вихід реактора з'єднано напряду з осаджувальною камерою без проміжних трубопроводів для забезпечення вільного виходу продуктів піролізу. Осаджувальна камера оснащена перегородкою, яку огинають продукти піролізу, та патрубком для видалення твердих фракцій вуглецевого залишку. На зовнішній поверхні бокових стінок осаджувальної камери встановлено два охоронні електричні нагрівачі потужністю 1 кВт кожен, які дозволяють підтримувати температуру цих елементів установки на рівні до 400 °С та запобігати передчасній конденсації біонафти через різкий перепад температур між зонами. Управління охоронними нагрівачами здійснюється за сигналами термопар, які закріплені на стінках осаджувальної камери за допомогою мікропроцесорних регуляторів температури.

Газовий тракт установки включає систему подачі азоту та систему трубопроводів, що з'єднують скруббер з пальником, що призначений для спалювання піролізного газу.

В якості сировини використовувалась різні зразки деревної тирси вологістю 4 % мас. з розмірами часток 0,5...0,7 мм, 0,5...1,0 мм та 0,5...5 мм та насипною щільністю відповідно 160 кг/м<sup>3</sup>, 138 кг/м<sup>3</sup> та 120 кг/м<sup>3</sup>. Для запобігання зависання сировини, бункер та вертикальний патрубок живильника обладнані відповідно мішалкою та шнеком, що приводяться в дію двигунами-редукторами.

Порядок проведення експериментів наступний. Зразки подрібненої біомаси масою 3...3,5 кг завантажували у бункер, який герметично закривали для уникнення витіку піролізних газів у зворотньому напрямку та запобігання загазованості лабораторного приміщення. Перед початком експерименту у нижній патрубок бункера протягом 20...25 хвилин подавали азот з постійною витратою 0,117 м<sup>3</sup>/год для продувки бункера та тракту від реактора до скруббера системи конденсації біонафти. Повітря з бункера витісняли азотом та виводили через верхній

патрубок та пальник у навколишнє середовище. Після цього відміряли дизельне пальне (3 л) та заливали у накопичувальний бак.

Після завантаження палива в бункер, герметизації установки та продувки її азотом вмикали електричні нагрівачі реактора, а також осаджувальної камери і розігрівали елементи установки до робочих температур, необхідних у даному експерименті. Регулювання температури реактора здійснювали по сигналах термопар, вмонтованих у зовнішню стінку реактора, з урахуванням перепадів температур між зовнішньою та внутрішньою стінками залежно від розрахункової продуктивності установки. Встановлене на регуляторі значення температури дорівнювало сумі необхідної температури сировини в реакторі та розрахункового перепаду температур по товщині стінки реактора. В експериментах температуру зовнішньої стінки реактора підтримували на рівні 550...650 °С, температуру осаджувальної камери на рівні 50 °С. Одночасно вмикали систему вимірювання та реєстрації температур, яка включає багатоканальний вимірювальний прилад та персональний комп'ютер.

Циркуляційний насос вмикали після виходу установки на необхідний температурний режим для подачі дизельного пального на зрошення скруббера.

Для забезпечення стабільної роботи системи живлення сировиною вмикали приводи мішалки бункера та шнека вертикального патрубка живильника. У щиті управління на перетворювачах частот, що живлять електричні двигуни приводу шнека реактора та шнека подачі палива, встановлювали частоти струму, що відповідають заданій швидкості обертання відповідних шнеків.

Умови проведення експериментів та отримані результати представлено у табл. 1, 2.

Як видно з результатів експерименту, горючі гази складають близько 80 % від об'єму усіх піролізних газів, отриманих в експерименті. Завдяки значному вмісту CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, що складає більше 50 % від об'єму, калорійність піролізного газу є досить високою. Він може бути використаний, наприклад, для організації нагріву реактора замість використання

електроенергії.

У табл. 3 приведено порівняння характеристик біонафти, отриманої на експериментальній установці ІТТФ та в Університеті Флоренції [5].

Виходячи з результатів можна зробити висновок, що отримана біонафта не поступається за основними характеристиками біонафті, отриманої іноземними авторами.

Табл. 1. Умови та результати експериментальних досліджень абляційного піролізу біомаси на лабораторній установці

| Показники                                       | Розмірність | Номер експерименту |         |                |         |         |
|-------------------------------------------------|-------------|--------------------|---------|----------------|---------|---------|
|                                                 |             | №1                 | №2      | №3             | №4      | №5      |
| Температура зовнішньої поверхні стінки реактора | °C          | 550                | 600     | 550            | 550     | 650     |
| Температура осаджувальної камери                | °C          | 50                 |         |                |         |         |
| Витрата азоту для продувки                      | м³/год      | 0,117              |         |                |         |         |
| Швидкість руху часток сировини в реакторі       | м/с         | 1,0                |         |                |         |         |
| Розмір частинок сировини                        | мм          | 0,5...1            | 0,5...1 | 0,5...0,7      | 0,5...5 | 0,5...5 |
| Час перебування частинок біомаси в реакторі     | с           | 1,0                |         |                |         |         |
| Вологість сировини                              | %           | 4                  |         |                |         |         |
| Час експерименту                                | хв.         | 180                | 130     | 45             | 120     | 180     |
| Температура охолоджувальної рідини              | °C          | 12                 | 14      | 10             | 12      | 13      |
| Витрата охолоджувальної рідини                  | м³/год      | 0,18               |         |                |         |         |
| Маса переробленої біомаси                       | кг          | 2,88               | 2,57    | 3,49           | 2,68    | 3,13    |
| Маса вуглецевого залишку                        | кг          | 0,7                | 0,432   | 1,47           | 0,998   | 0,78    |
| Вихід вуглецевого залишку                       | % мас.      | 24,3               | 16,8    | 42             | 37      | 24,9    |
| Маса біонафти                                   | кг          | 1,408              | 1,262   | 1,38           | 1,18    | 1,21    |
| Вихід біонафти                                  | % мас.      | 48,9               | 49,1    | 39             | 44      | 38,6    |
| Густина біонафти                                | кг/м³       | 1110               | 1190    | 1140           | 1020    | 1105    |
| Вища теплота згорання біонафти                  | МДж/кг      | не визначалася     | 13,77   | не визначалася |         |         |
| Вихід газів та втрати (по балансу)              | % мас.      | 26,8               | 34,1    | 18             | 19      | 36,5    |
| Продуктивність установки по біомасовій сировині | кг/год      | 0,96               | 1,186   | 4,65           | 1,338   | 1,044   |

Табл. 2. Компонентний склад піролізного газу з експерименту № 2

| Компонент    | H <sub>2</sub> | CO    | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> | Сума | Q <sub>p</sub> |
|--------------|----------------|-------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------|----------------|------|----------------|
| % від об'єму | 9,51           | 34,03 | 11,65           | 24,35           | 1,43                          | 1,38                          | 0,19                          | 0,71                          | 0,55                            | 1,72             | 14,19          | 100  | 12,67 МДж/м³   |

Табл. 3. Властивості біонафти установки ІТТФ та Університету Флоренції

| Назва показника                                       | Одиниця вимірювання | Результати аналізу ІТТФ | Результати аналізу Університету Флоренції |
|-------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------------------------|
| Масова частка вологи                                  | %                   | 47,2                    | 20...30                                   |
| Масова частка сірки                                   | %                   | 0,028                   | 0,02...0,05                               |
| Вища теплота згорання                                 | МДж/кг              | 16,01                   | 16,6...19,4                               |
| Теплота згорання нижча в перерахунку на робоче паливо | МДж/кг              | 13,77                   | 13...18                                   |

Як видно масова частка вологи складає 47,2 %, що у порівнянні з даними Університету Флоренції є досить великим показником. У літературних та наукових джерелах [7, 9] зустрічаються дані, що в лабораторних установках вихід піролізної рідини із сухої низькозольної біомаси може складати до 65 % за вагою. Але навіть при використанні сухої біомаси вода завжди утворюється внаслідок процесу піролізу з компонентів палива, а

загальний вихід рідких продуктів з сухої біомаси може досягати 75 %. Природна вологість сировини впливає на вміст  $H_2O$  у біонафті. У випадках, коли вологість дуже висока (понад 30 %) біонафта розділяється на дві фази, що мають різні властивості [5, 6, 9].

Вуглецевий залишок після кожного експерименту збирався для проведення відповідних аналізів, результати яких представлені у табл. 4.

Табл. 4. Характеристики вуглецевого залишку для експерименту №2

| Показники                                                                  | Розмірність | Величина                    | Нормативний документ на метод випробувань |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------|-------------------------------------------|
| Загальна волога аналітичного зразка при робочому стані палива              | %           | 3,8                         | ГОСТ 27314                                |
| Зольність<br>- на робочий стан палива,<br>- на сухий стан палива           | %           | 3,1<br>3,2                  | ГОСТ 11022<br>ГОСТ 27313                  |
| Вища теплота згорання на сухий стан палива                                 | МДж/кг      | 30,4                        | ДСТУ ISO 1928: 2006                       |
| Нижча теплота згорання на робочий стан палива                              | МДж/кг      | 28,2                        | ДСТУ ISO 1928: 2006                       |
| Масова частка сірки<br>- на робочий стан палива;<br>- на сухий стан палива | %           | Менш ніж:<br>0,016<br>0,017 | ДСТУ ISO 1928: 2006                       |

Як видно з таблиці, вуглецевий залишок має дуже високу вищу теплоту згорання (~30 МДж/кг), тому його можна використовувати в якості палива для побутового застосування, а також для технологічних потреб промисловості. Існує багато різноманітних сфер застосування цьому продукту, наприклад, використання для виробництва брикетів з деревного вугілля, а також як палива безпосередньо або в суміші з кам'яним вугіллям.

Продукти згорання вуглецевого залишку містять менше оксидів сірки та азоту, ніж продукти згорання кам'яного вугілля. Вуглецевий залишок також може бути використаний для виробництва активованого вугілля [7].

Проведена серія експериментів показала, що конструкція шнеку потребує подальшої модернізації з метою ефективнішого проведення процесу піролізу деревної тирси. Цілком ймовір-

но, що частка деревини повністю не розкладається при проходженні через реактор. При цьому час існування смоляних парів є достатньо високим та, як наслідок, вони зазнають впливу вторинних реакцій. Цим і пояснюється менша частка виходу біонафти та високий вміст вологи в ній, у порівнянні з іноземними аналогами.

Частки сировини проходять реактор з майже однаковою швидкістю. У першій зоні реактора частки розігріваються до необхідної температури для піролізного розкладання, у другій вони розкладаються на парогазову суміш та тверді частки вуглецевого залишку. Утворені продукти піролізу перебувають у даному стані більше часу, ніж необхідно для запобігання вторинних реакцій, перш ніж вони будуть видалені з реактору. Згідно показанням термопар, що розміщені на корпусі реактора, спостерігалось падіння температури на вході реактора під час надходження свіжої сировини на 50...100°C у залежності від продуктивності системи подачі сировини. Зона, в якій спостерігалось падіння температури, поширювалась майже на третину довжини реактору. Це дає змогу стверджувати, що біомаса, пройшовши 1/3 довжини реактору, далі не відбирає тепло від корпусу реактора і, відтак, повністю розігрівається до необхідної для процесу піролізу температури, а може й перегріватись завдяки роботі транспортування в реакторі.

Враховуючи виявлені особливості проходження процесу абляційного процесу, подальші вдосконалення реактору полягають у оптимізації кроку витків шнеку, що призведе до збільшення швидкості проходження сировини через першу та третю зони реактора, а через другу зону – до її зменшення. Таким чином, зменшується час нагрівання сировини до необхідної температури, а продукти піролізу максимально швидко видаляються з реактору.

Результати робіт іноземних авторів [3, 5, 6, 9] та отримані результати експериментів дозволяють стверджувати, що для ефективного проведення процесу абляційного піролізу повинні виконуватися такі умови:

- висока щільність теплового потоку від нагрівача до зразку – до 5 МВт·м<sup>-2</sup>;
- ефективне видалення первинних продуктів

піролізу з поверхні реактора для забезпечення часу перебування продуктів піролізу в парогазовому стані до 1 с;

- відсутність кисню у зоні реакції;
- швидкість переміщення часток у реакторі – 1 м/с.

### Висновки

1. Модифіковано лабораторну установку, а саме організовано трьохзонний регульований нагрів реактору, систему подачі сировини обладнано додатковим шнеком вертикального патрубку та мішалкою бункеру, систему утилізації піролізних газів оснащено газгольдером та пальником для спалювання піролізного газу.

2. Проведено серію експериментів з піролізу подрібненої деревної біомаси (тирси) з отриманням біонафти. Отримана біонафта має властивості, що є типовими для рідини – продукту швидкого піролізу біомаси.

3. Визначено оптимальні режимні параметри роботи пілотної піролізної установки з виходом біонафти близько 50 % від маси переробленої сировини:

- температура корпусу реактора – 600 °C,
- фракція часток сировини повинна бути в межах 0,5...1 мм,
- продуктивність системи подачі сировини – 1,2 кг/год,
- швидкість руху часток сировини в реакторі – 1 м/с.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Bridgwater A.V.* The Status of Fast Pyrolysis of Biomass in Europe // Proc. of the 10th Europ. Bioenergy Conf., Wurzburg, Germany, 8-11 June, 1998, CARMEN, – 1998. – P. 268-271.
2. *Lédé J.* Biomass fast pyrolysis reactors: a review of a few scientific challenges and of recommended research topics // Oil Gas Sci. Technol.–Rev. IFP Energies Nov. 68 (5) – 2013.- P. 801–814.
3. *Lédé J., Diebold J.P., Peacocke G.V.C., Piskorz J.* The nature and properties of intermediate and unvaporized biomass pyrolysis materials, in: A.V. Bridgwater, et al. (Eds.) // Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook, CPL Press, Newbury (UK) 1999.

4. *Lede J., Panagopoulos J., Li H.Z. and Villiermaux J.* Fast pyrolysis of wood: direct measurement and study of ablation rate // *Fuel*, – 1985. – Vol. 64, Issue 11. – P. 1514–1520.
5. *Chiaramonti D., Oasmaa A., Solantausta Y.* “Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass” // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (<http://www.sciencedirect.com>), 2005.
6. Гелетуха Г.Г., Жовмір М.М., Желєзна Т.А., Зубенко В.І. Експериментальне дослідження швидкого піролізу біомаси в абляційному шнековому реакторі.// *Промислова теплотехніка*. – 2013. – Т.35, №1, С.87 – 92
7. *Bridgwater A.V.* Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading // *Biomass Bioenergy* 38 (2011), P. 1–27.
8. *Lede J., Authier O.* Temperature and heating rate of solid particles undergoing a thermal decomposition. Which criteria for characterizing fast pyrolysis? // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2015. – Vol. 113, P. 1–14
9. *Mettler M.S., Mushrif S.H., Paulsen A.D., Javadkar A.D., Vlachos D.G., Dauenhauer P.J.* Revealing pyrolysis chemistry for biofuels production: conversion of cellulose to furans and small oxygenates, *Energy Environ. Sci.* 5 (2012), P.5414–5424.

# RESEARCH OF BIOMASS FAST PYROLYSIS IN THE ABLATIVE SCREW REACTOR

Klimenko V.M.<sup>1</sup>, Bashtovyi A.I.<sup>1</sup>, Zubenko V.I.<sup>1</sup>, Antoshchuk T.O.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

<sup>2</sup>Scientific Engineering Centre "Biomass", str. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03067, Ukraine

In the article flowsheet of the laboratory pyrolysis installation with the screw type reactor and the explanation how it works are given. The results of the experiments of fast pyrolysis of biomass with the propose to obtain bio-oil, carbonaceous residue and pyrolysis gas in the ablative reactor were presented. The comparative analysis with foreign similar experimental data was carried out. The process of ablative pyrolysis of biomass was investigated and the measures to further improving of the technology were proposed. It was discovered that the effective ablative pyrolysis process should be carried out under the following condition: high heat flux, effective removal of the primary pyrolysis products from the reactor surface and the absence of oxygen in the reaction zone.

References 9, tables 4, figure 1.

**Key words:** pyrolysis, biomass, bio-oil, pyrolysis gas, carbonaceous matter

1. *Bridgwater A.V.* The Status of Fast Pyrolysis of Biomass in Europe // Proc. of the 10th Europ. Bio-energy Conf., Wurzburg, Germany, 8-11 June, 1998, CARMEN, – 1998. – P. 268-271.

2. *Lédé J.* Biomass fast pyrolysis reactors:

a review of a few scientific challenges and of recommended research topics // Oil Gas Sci. Technol.–Rev. IFP Energies Nov. 68 (5) – 2013.– P. 801–814.

3. *Lédé J., Diebold J.P., Peacocke G.V.C., Piskorz J.* The nature and properties of intermediate and unvaporized biomass pyrolysis materials, in: A.V. Bridgwater, et al. (Eds.) // Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook, CPL Press, Newbury (UK) 1999.

4. *Lede J., Panagopoulos J., Li H.Z. and Villermaux J.* Fast pyrolysis of wood: direct measurement and study of ablation rate // Fuel, – 1985. – Vol. 64, Issue 11. – P. 1514–1520.

5. *Chiaramonti D., Oasmaa A., Solantausta Y.* "Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass" // Renewable and Sustainable Energy Reviews (<http://www.sciencedirect.com>), 2005.

6. *Geletukha G.G., Zhovmir M.M., Zheliezna T.A., Zubenko V.I.* Experimental investigation of biomass fast pyrolysis in the ablative screw reactor // Promyshlennaya teplotekhnika . – 2013, v. 35, N 1, P. 87 – 92.

7. *Bridgwater A.V.* Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading // Biomass Bioenergy 38 (2011), P. 1–27.

8. *Lede J., Authier O.* Temperature and heating rate of solid particles undergoing a thermal decomposition. Which criteria for characterizing fast pyrolysis? // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2015. – Vol. 113, P. 1–14.

9. *Mettler M.S., Mushrif S.H., Paulsen A.D., Javadekar A.D., Vlachos D.G., Dauenhauer P.J.* Revealing pyrolysis chemistry for biofuels production: conversion of cellulose to furans and small oxygenates, Energy Environ. Sci. 5 (2012), P.5414–5424.

Получено 16.02.2016

Received 16.02.2016

УДК 620.92

## АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СТРАТЕГІЙ КРАЇН ЄС ТА СВІТУ І РОЛІ В НИХ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ. ЧАСТИНА 1

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

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

Розглянуто поточний стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в світі та в Європейському Союзі. Проаналізовано існуючі енергетичні стратегії та прогнози розвитку енергетики до 2050 року. Показано необхідність скорочення загального споживання первинної енергії за рахунок широкого впровадження енергоефективних технологій та енергоощадних заходів.

Рассмотрено современное состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики в мире и в Европейском Союзе. Проанализированы существующие энергетические стратегии и прогнозы развития энергетики до 2050 года. Показана необходимость сокращения общего потребления первичной энергии за счет широко внедрения энергоэффективных технологий и энергосберегающих мер.

The paper covers state of the art and prospects for the development of renewable energy in the world and in the European Union. Available energy strategies and forecasts for the energy sector development until 2050 are analyzed. It is shown that it is necessary to reduce total consumption of primary energy by introducing energy efficient technologies and energy saving measures.

Бібл. 9, табл. 1, рис. 6.

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, відновлювана енергетика, кінцеве енергоспоживання, енергоефективність, парникові гази.

ВВП – валовий внутрішній продукт;  
ВДЕ – відновлювані джерела енергії;  
ЖКГ – житлово-комунальне господарство;  
ЗППЕ – загальне постачання первинної енергії;  
КСК – концентруючі сонячні колектори;

ОЕСР – Організація економічного співробітництва та розвитку;  
ФЕ – фотоелектричні елементи;  
н.е. – нафтовий еквівалент.

### *Загроза глобального потепління*

З ростом індустріального виробництва в світі зросла кількість викидів парникових газів в атмосферу, що, в свою чергу, призвело до глобальних змін клімату. Для запобігання цьому у 1997 році було прийнято Кіотський протокол, до якого (станом на листопад 2009 р.) приєдналися 192 країни, відповідальні за 64 % викидів парникових газів в світі. Незважаючи на зусилля багатьох країн з реалізації Кіотського протоколу, їх було недостатньо для запобігання глобальному потеплінню.

Міжнародне енергетичне агентство у 2012 році представило аналіз поточного стану розвитку світової енергетики, а також три сценарії зміни клімату до 2050 року, базуючись на різних стратегіях та пріоритетах в енергетичному

секторі [1]. Найпривабливішим та найбезпечнішим для нашої планети є сценарій 2DS (підвищення середньорічної температури на 2 °С до 2050 року). Для втілення цього сценарію потрібні суттєві зміни в структурі глобальної енергетики, зокрема, обсяги викидів парникових газів до 2050 року мають скоротитися вдвічі у порівнянні з 2009 роком (рис. 1). Крім того, енергоемність світової економіки повинна постійно знижуватись, а споживання енергії – зменшуватись (рис. 2).

У грудні 2015 р. на черговій зустрічі Конференції сторін Рамкової конвенції ООН про зміну клімату в Парижі 195 країн ухвалили текст нової кліматичної угоди, що започаткує нову еру глобальної боротьби зі зміною клімату на планеті. Головний здобуток угоди –

домовленість країн, що не можна перевищувати рівень потепління більше ніж на 2 °С. Також вони заявили, що докладуть максимальних зусиль, щоб не перевищити 1,5 °С потепління. Щоб цього досягти, країнам доведеться відмовлятися від викопного палива та переходити на

відновлювані джерела енергії. Крім того, країни також погодилися стати вуглецево-нейтральними у другій половині цього століття. Це означає, що викиди парникових газів від людської діяльності не мають перевищувати їх поглинання екосистемами.

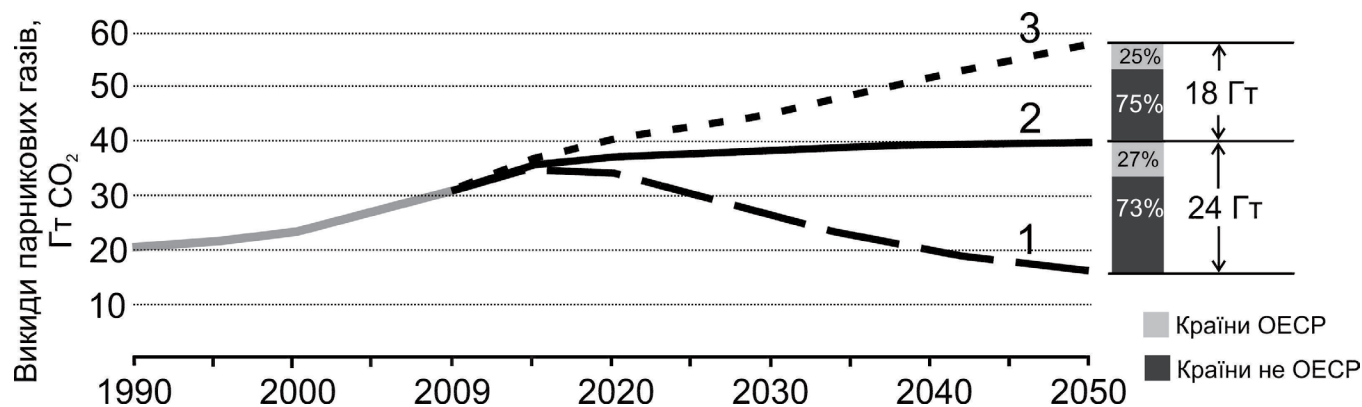


Рис. 1. Динаміка зміни обсягу викидів парникових газів у світовій енергетиці згідно трьох сценаріям зміни клімату планети [1].



Рис. 2. Динаміка зміни загального енергопостачання та енергоємності ВВП при сценарії 2DS [1].

### Сучасний стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в світі

На сьогодні відновлювані джерела енергії забезпечують близько 19 % кінцевого енергоспоживання в світі, зокрема традиційна біомаса – 9 %, сучасні ВДЕ – більше 10 % (виробництво теплової та електричної енергії, транспортний сектор). Загалом за рахунок біомаси (традиційної та сучасної) покривається близько 14 % кінцевого споживання енергії. Термін «традиційна біомаса» означає безпосереднє використання біомаси для приготування їжі та для

обігріву у країнах, що розвиваються. Поняття «сучасні ВДЕ/біомаса» стосується використання ВДЕ/біомаси в сучасних технологіях виробництва енергії.

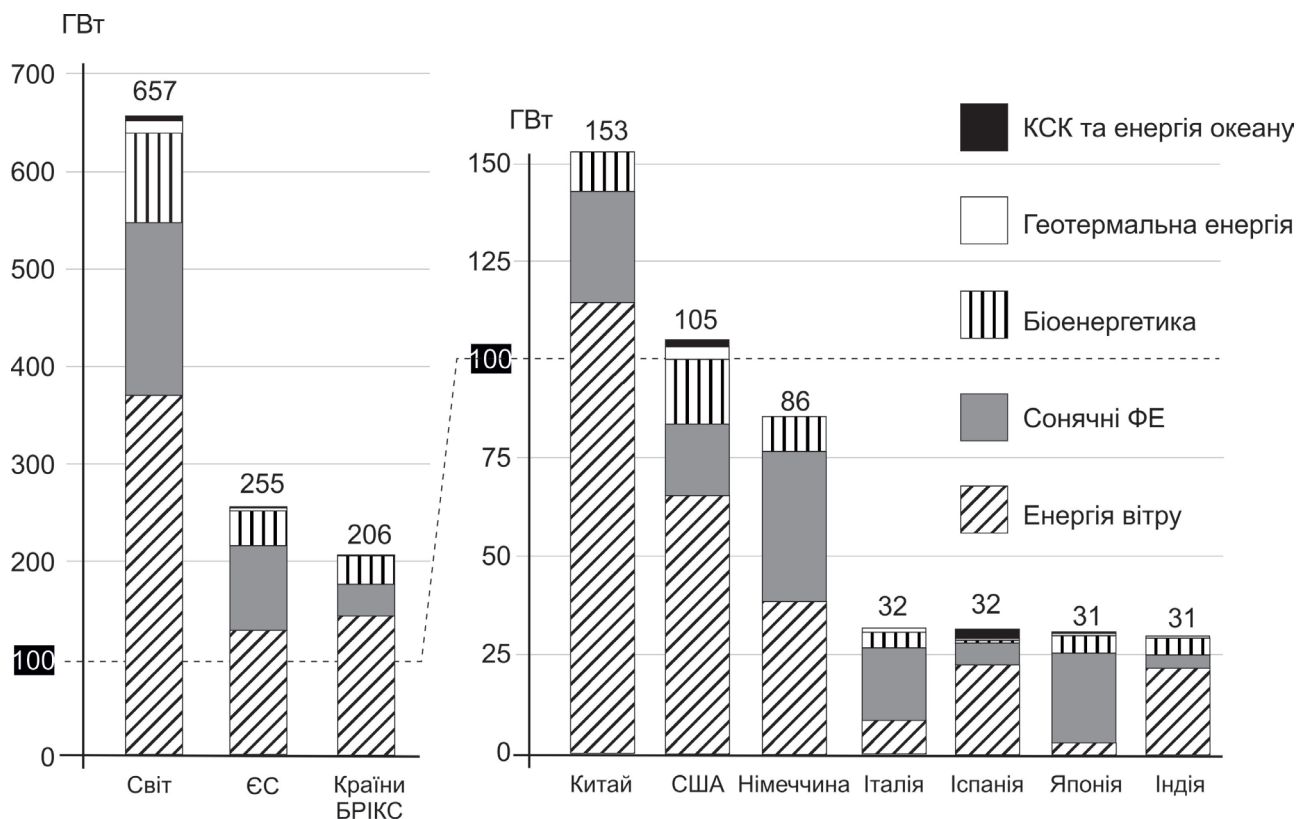
Внесок відновлюваних джерел енергії до загального виробництва електроенергії в світі становить майже 23 %, при цьому лівова частка припадає на гідроенергію – 16,6 %. З інших ВДЕ найбільша частка у вітроенергії – 3,1 %, за якою слідує біомаса – 1,8 %. Найкрупнішими виробниками «зеленої» електроенергії є 7 країн, сумарні потужності яких складають 71,5 % світових (470

ГВт, без врахування гідроенергії): Китай, США, Німеччина, Італія, Іспанія, Японія, Індія (рис. 3) [2].

Теплова енергія становить близько половини кінцевого енергоспоживання в світі. Більше чверті потреби в тепловій енергії забезпечується за рахунок відновлюваних джерел, зокрема 17 % дає традиційна біомаса, 7 % – сучасна біомаса і лише 1 % – інші сучасні ВДЕ.

Міжнародне Агентство з відновлюваної енергетики розробило Дорожню Карту для досягнення подвоєння частки відновлюваних

джерел енергії у світовому споживанні енергії у період 2010...2030 рр. (REmap 2030): з 18 % ВДЕ у загальному кінцевому енергоспоживанні (2010 р.) до 36 % (2030 р.) [3]. При цьому сучасні відновлювані джерела енергії мають поступово витіснити використання традиційної біомаси. Оскільки у 2010 р. з 18 % ВДЕ половина припадала на традиційну біомасу, то у 2030 р. частка сучасних ВДЕ має більш ніж потроїтись (до 30 %), залишаючи традиційному використанню біомаси лише 6 % (рис. 4).



**Рис. 3. Встановлена електрична потужність ВДЕ у світі без врахування гідроенергії (2014 р.) [2].**

Цікаво порівняти Дорожню Карту REmap 2030 з прогнозом Світової Енергетичної Ради, яка розробила два сценарії розвитку світової енергетики до 2050 року [4]. Сценарій 1 передбачає доволі повільний розвиток відновлюваної енергетики – 20 % загального постачання первинної енергії у 2050 році та досить суттєве зростання ЗППЕ порівняно з 2010 роком – на 38 % (з 546 ЕДж/рік у 2010 р. до 879 ЕДж/рік у 2050 р.). Цей сценарій видається малореа-

лістичним, оскільки його ціль з ВДЕ досягнуто вже зараз.

Сценарій 2 є більш реалістичним. Він передбачає переважний розвиток відновлюваної енергетики та зростання енергоефективності. Завдяки цьому у 2050 році частка ВДЕ має досягти близько 30 % у ЗППЕ та 50 % у виробництві електроенергії. При цьому загальне постачання енергії у період 2010...2050 рр. зросте лише на 22 %.



**Рис. 4. Плани щодо подвоєння частки ВДЕ у загальному кінцевому енергоспоживанні світу згідно Дорожньої Карти REmap 2030 [3].**

#### **Проекти по досягненню 100 % споживання відновлюваної енергії**

На сьогоднішній день в світі нараховується близько 150 запланованих та вже реалізованих проектів із повного переходу на відновлювану енергетику. Вони поділяються на декілька категорій: міські, регіональні, державні, проекти у житловому фонді та у бізнесі. Серед таких проектів по окремих країнах, містах та компаніях можна виділити наступні [5]:

- Данія поставила за мету до 2035 р. досягти 100 % виробництва теплової та електричної енергії з відновлюваних джерел та 100 % енергії з ВДЕ в усіх секторах до 2050 р.
- В Ісландії вже досягнуто 100 % виробництва електроенергії та 85 % теплової енергії за рахунок ВДЕ.
- Шотландія: мета – 100 % виробництва електроенергії та забезпечення 30 % загальної потреби в енергії за рахунок ВДЕ до 2020 р.
- Мальдіви: мета – 100 % енергії з ВДЕ до 2020 року.
- Коста-Ріка з початку 2015 року забезпечує потребу в електроенергії на 100 % за рахунок ВДЕ. До 2020 року поставлено за мету до-

сягти повної декарбонізації. Тут і далі «повна декарбонізація» або «100 % скорочення викидів парникових газів» означає, що викиди парникових газів від людської діяльності не мають перевищувати їх поглинання екосистемами.

- Саудівська Аравія прийняла рішення до 2040 року повністю відмовитися від використання викопних палив й замінити їх відновлюваними джерелами енергії.

- Уряд Уругваю зробив офіційну заяву, що станом на грудень 2015 року 94,5 % потреби країни в електроенергії забезпечується за рахунок відновлюваних джерел. До 2017 року планується знизити викиди вуглецю в атмосферу на 88 % у порівнянні з середніми показниками 2009...2013 рр. й досягти повної декарбонізації до 2030 року.

- Три міста США (Аспен, Бурлінгтон, Вермонт) вже повністю перейшли на відновлювану енергетику. Міста Сан-Франциско, Пало-Альто, Сан-Дієго, Ітака, Грінсбург, Джорджтаун, Сан-Хосе також взяли за мету перехід на ВДЕ і вже мають прийняті відповідні програми.

- Ванкувер (Канада): у 2015 року були прийняті зобов'язання щодо переходу міста на

100 % з ВДЕ.

- Франкфурт (Німеччина): запланована повна декарбонізація міста за рахунок ВДЕ та альтернативного автомобільного палива до 2050 року.

- Копенгаген (Данія): мета – до 2035 р. досягти 100 % виробництва теплової та електричної енергії з відновлюваних джерел та 100 % енергії з ВДЕ в усіх секторах до 2050 р. Повна декарбонізація міста запланована до 2025 року. Наразі вже 98 % населення отримують теплову енергію з твердих побутових відходів та біомаси.

- Мюнхен (Німеччина): мета – 100 % електроенергії з ВДЕ у житловому фонді до 2015 року та для всіх споживачів до 2025 року.

- Мальмо (Швеція): мета – 100% відновлюваної електроенергії до 2020 року.

- Сідней (Австралія): мета – 100% виробництва електроенергії, теплоти та холоду з ВДЕ до 2030 року.

До акції переходу на відновлювану енергетику підключились такі всесвітньо відомі бренди, як IKEA, Johnson & Johnson, Nike, Procter & Gamble, Starbucks, Voya Financial and Walmart, Google, Apple, Microsoft, Facebook, Virgin Group, RWE, E.ON та інші. За свою мету вони ставлять використання електроенергії виключно з відновлюваних джерел в усіх секторах своєї діяльності.

### *Енергетичні стратегії Європейського Союзу*

В Європейському Союзі стан розвитку відновлюваної енергетики в цілому близький до загальносвітових показників. Внесок ВДЕ до кінцевого енергоспоживання складає майже 16 % (табл. 1), в тому числі біомаси – більше 9 %. Частка ВДЕ у виробництві електроенергії становить 25,4 %, зокрема з біомаси отримується близько 5 %. Більше 19 % загального обсягу теплової енергії в ЄС виробляється з відновлюваних джерел, головним чином, з біомаси.

Табл. 1. Досягнуті та заплановані показники щодо частки ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії в Євросоюзі (%) [6]

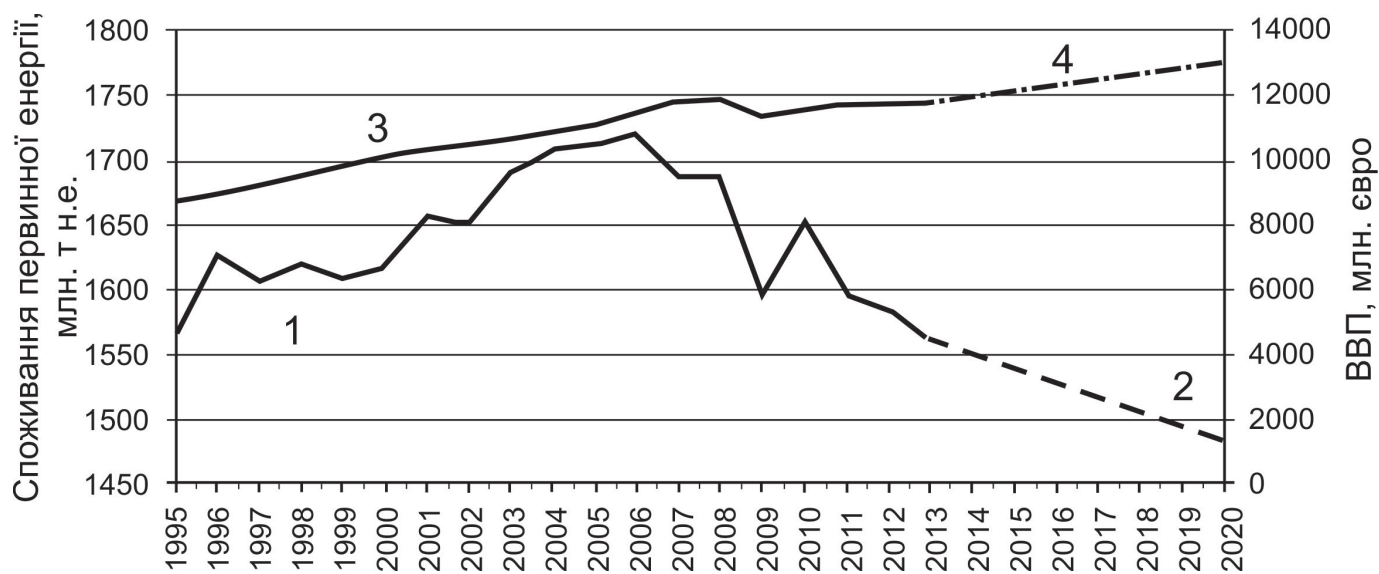
| Країни ЄС         | 2014  | 2020 | Країни ЄС       | 2014  | 2020 |
|-------------------|-------|------|-----------------|-------|------|
| ЄС                | 15,8  | 20   | Литва           | 23,5* | 23   |
| Бельгія           | 7,9   | 13   | Люксембург      | 4,7   | 11   |
| Болгарія          | 20,2* | 16   | Угорщина        | 10,9  | 13   |
| Чеська Республіка | 13,2* | 13   | Мальта          | 5,1   | 10   |
| Данія             | 28,5  | 30   | Нідерланди      | 5,4   | 14   |
| Німеччина         | 13,8  | 18   | Австрія         | 32,8  | 34   |
| Естонія           | 26,3* | 25   | Польща          | 11,5  | 15   |
| Ірландія          | 8,4   | 16   | Португалія      | 26,5  | 31   |
| Греція            | 15,3  | 18   | Румунія         | 24,5* | 24   |
| Іспанія           | 15,8  | 20   | Словенія        | 22,1  | 25   |
| Франція           | 14,5  | 23   | Словаччина      | 12,0  | 14   |
| Хорватія          | 19,8  | 20   | Фінляндія       | 37,9  | 38   |
| Італія            | 17,4* | 17   | Швеція          | 53,7* | 49   |
| Кіпр              | 8,2   | 13   | Велика Британія | 6,7   | 15   |
| Латвія            | 36,1  | 40   |                 |       |      |

\* Країни, які вже перевищили свою офіційну мету 2020 року.

Для досягнення мети 2020 року (20 % ВДЕ у валовому кінцевому енергоспоживанні) країни ЄС мають не тільки нарощувати потужності відновлюваної енергетики, але й скорочувати споживання первинної енергії – загалом по ЄС-28 приблизно на 5 % до 2020 р. порівняно з 2013 р. (рис. 5).

Щоб дотриматись сценарію зміни клімату 2DS, у 2011 р. Євросоюз ще раз підтвердив свою офіційну мету по зниженню емісії парникових газів (декарбонізації) у 2050 році на 80...95 % у порівнянні з показниками 1990 року

(рис. 6) [8]. Оскільки сектор енергетики є одним з основних джерел викидів парникових газів, які пов'язані з діяльністю людини, то й головні резерви по зменшенню цих викидів мають бути знайдені і реалізовані саме в ньому. З огляду на це, Європейська Комісія розробила Дорожню Карту з енергетики до 2050 року [9], в якій проаналізувала, як саме можна досягти поставлених цілей по зниженню емісії парникових газів, забезпечуючи при цьому надійність та конкурентоспроможність систем енергопостачання.



1, 2 – фактичне та прогнозоване споживання первинної енергії в ЄС, відповідно, 3 – фактичний ВВП (при ринкових цінах 2005 р.), 4 – прогнозований ВВП (приріст 1,5%)

**Рис. 5. Динаміка споживання первинної енергії та ВВП в ЄС-28 [7].**

В Дорожній Карті ЄС розглянуто п'ять можливих сценаріїв розвитку енергетики (так звані сценарії декарбонізації). В основу кожного з них покладено одне з наступних припущень щодо того, яка саме тенденція буде превалювати в майбутньому в енергетичному секторі Європейського Союзу (детальний аналіз даних п'яти сценаріїв розвитку представлено в роботі [10]):

1. Суттєве підвищення енергоефективності та енергозбереження («сценарій енергоефективності»). Завдяки цьому потреба ЄС в енергії у 2050 році має знизитись приблизно на 40 % порівняно з піком 2005...2006 років.

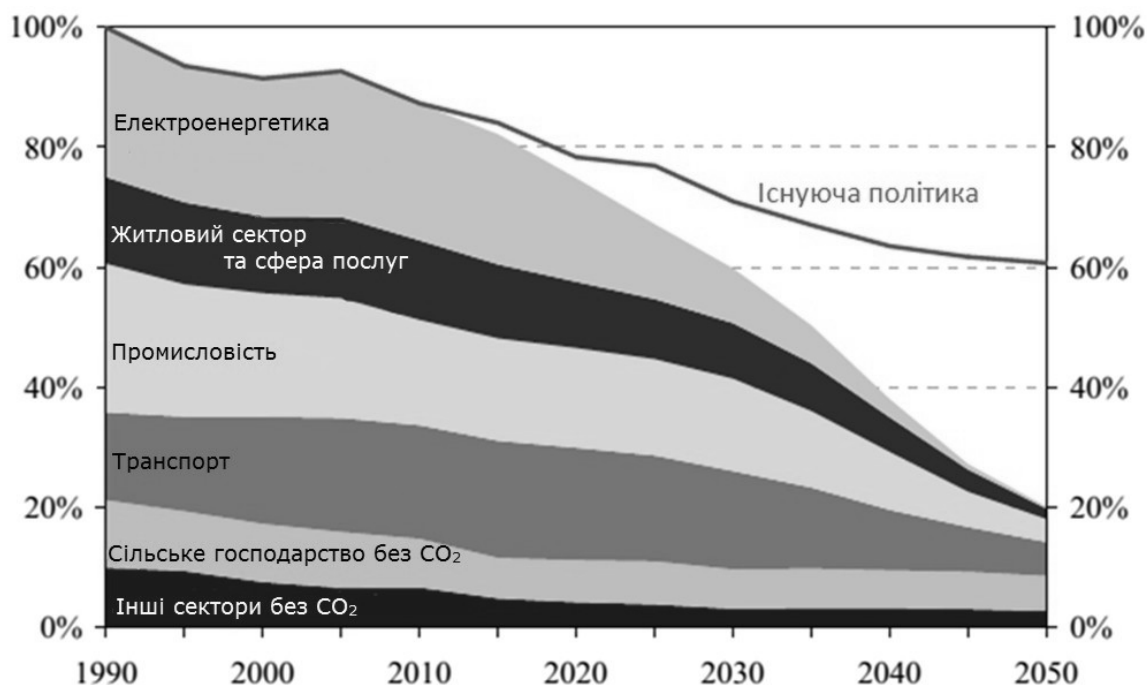
2. Суттєве підвищення частки відновлюваних джерел енергії в енергобалансі («сценарій

ВДЕ»). В результаті цього частка ВДЕ в кінцевому енергоспоживанні має досягти 75 %, а у споживанні електроенергії – 97 % в 2050 році.

3. Диверсифікація джерел енергопостачання. В даному сценарії перевага не надається жодному джерелу енергії, всі вони конкурують між собою на ринкових засадах. Декарбонізація в даному випадку буде досягнута шляхом впровадження відповідної податкової політики щодо обсягів викидів вуглецю.

Розглянуто також дві варіації цього сценарію:

4. Диверсифікація джерел енергопостачання з відстроченим впровадженням технологій уловлювання і зберігання вуглецю.



**Рис. 6. Стратегія скорочення викидів парникових газів в ЄС до 2050 р. на 80 % порівняно з 1990 р. відповідно до зобов'язань урядів країн-членів ЄС [8].**

5. Диверсифікація джерел енергопостачання за умови, що нові атомні блоки не будуть споруджуватись, окрім тих, що будуються вже зараз.

Варто зазначити, що «сценарій ВДЕ» непогано узгоджується з прогнозом перспектив розвитку енергетики ЄС, виконаним Європейською радою з ВДЕ [11]. Цей прогноз показує реальну можливість покриття потреби ЄС в енергії у 2050 році майже на 100 % за рахунок відновлюваних джерел, в тому числі біомаса – 34 %, сонячна енергія – 26 %, геотермальна енергія 17 %, енергія вітру – 13 %, решта (6 %) – інші ВДЕ. При цьому кінцеве енергоспоживання у 2050 р. (1050 млн. т н.е.) має скоротитися на 12 % у порівнянні з 2020 р. (1200 млн. т н.е.).

### Висновки

Загроза глобального потепління, вичерпність викопних палив та інші виклики сучасності змушують країни світу суттєво змінювати структуру енергетичного сектору. Наразі можна спостерігати дві основні тенденції – заміну традиційних енергоносіїв відновлюваними джерелами енергії та скорочення загального енер-

госпоживання за рахунок впровадження енергоефективних технологій та заходів. Все більше країн розробляють і реалізують плани та стратегії для значного, в межах 50...100 %, покриття своїх енергетичних потреб за рахунок відновлюваних джерел енергії.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Energy technology perspectives 2012. Pathway to a Clean Energy System.* IEA, 2012. [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP2012\\_free.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP2012_free.pdf)
2. *Renewables 2015. Global Status Report.* REN21, 2015. <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>
3. *REmap 2030: A Renewable Energy Roadmap,* IRENA, 2014. [http://www.irena.org/remap/IRENA\\_REmap\\_Report\\_June\\_2014.pdf](http://www.irena.org/remap/IRENA_REmap_Report_June_2014.pdf)
4. *World Energy Scenarios. Composing energy futures to 2050.* WEC, 2013. [https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/World-Energy-Scenarios\\_Composing-](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/World-Energy-Scenarios_Composing-)

energy-futures-to-2050\_Full-report.pdf

5. *Go 100% Renewable Energy project*.  
<http://www.go100percent.org/cms/index.php?id=19>

6. *EurObserv'ER* press release of December 2015.  
<http://www.eurobserv-er.org/pdf/press/2015/EurObservER-Press-Release-Estimates-of-the-renewable-energy-2015.pdf>

7. *Krzysztof Gierulski*. Energy Efficiency Indicators in the EU Energy Efficiency Directive. Презентація на семінарі ПРООН, Київ, 13.10.2015.

8. *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*. COM(2011) 112 final, 8.3.2011  
<http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:>

5db26ecc-ba4e-4de2-ae08-dba649109d18.0002.03/DOC\_1&format=PDF

9. *Energy Roadmap 2050*. COM(2011) 885 final, 15.12.2011.  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0885&from=EN>

10. *Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Дроздова О.І.* Аналіз основних положень Дорожньої Карти ЄС з енергетики до 2050 року // Промислова теплотехніка. – 2012, Т. 34, № 6. – С. 64–69.

11. *RE-Thinking 2050*. A 100% Renewable Energy Vision for the European Union. EREC, 2010.  
[http://www2.warwick.ac.uk/fac/soc/csgr/green/foresight/energyenvironment/2010\\_erec\\_rethinking\\_2050.pdf](http://www2.warwick.ac.uk/fac/soc/csgr/green/foresight/energyenvironment/2010_erec_rethinking_2050.pdf)

# ANALYSIS OF ENERGY STRATEGIES OF EU AND WORLD COUNTRIES AND THE ROLE OF RENEWABLES IN THE STRATEGIES. PART 1

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

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

The paper covers state of the art and prospects for the development of renewable energy in the world and in the European Union. Energy strategies and forecasts for the energy sector development until 2050 are analyzed. It is shown that the threat of global warming, the fact that fossil fuels are exhaustible and other challenges of the present time force countries to change the structure of energy sector significantly. Now one can observe two basic tendencies, namely replacement of fossil fuels by renewables and reduction of the total energy consumption at the expense of introduction of energy efficient technologies and energy saving measures. More and more countries are developing and implementing plans and strategies for considerable, up to 50...100 %, covering energy demand at the expense of renewable energy sources. At the same time, they act appropriately on reducing consumption of primary energy.

References 9, tables 1, figures 6.

**Key words:** renewable energy sources, renewable energy, final energy consumption, energy efficiency, greenhouse gases

1. *Energy technology perspectives* 2012. Pathway to a Clean Energy System. IEA, 2012. [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP2012\\_free.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP2012_free.pdf)

2. Renewables 2015. Global Status Report. REN21, 2015.

<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>

3. REmap 2030: A Renewable Energy Roadmap, IRENA, 2014.

[http://www.irena.org/remap/IRENA\\_REmap\\_Report\\_June\\_2014.pdf](http://www.irena.org/remap/IRENA_REmap_Report_June_2014.pdf)

4. *World Energy Scenarios*. Composing energy futures to 2050. WEC, 2013.

[https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/World-Energy-Scenarios\\_Composing-energy-futures-to-2050\\_Full-report.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/World-Energy-Scenarios_Composing-energy-futures-to-2050_Full-report.pdf)

5. *Go 100% Renewable Energy project*. <http://www.go100percent.org/cms/index.php?id=19>

6. *EurObserv'ER press release of December 2015*.

<http://www.eurobserv-er.org/pdf/press/2015/EurObservER-Press-Release-Estimates-of-the-renewable-energy-2015.pdf>

7. Krzysztof Gierulski. Energy Efficiency Indicators in the EU Energy Efficiency Directive. Presentation at UNDP seminar, Kyiv, 13.10.2015.

8. *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*. COM(2011) 112 final, 8.3.2011

[http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5db26ecc-ba4e-4de2-ae08-dba649109d18.0002.03/DOC\\_1&format=PDF](http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5db26ecc-ba4e-4de2-ae08-dba649109d18.0002.03/DOC_1&format=PDF)

9. *Energy Roadmap 2050*. COM(2011) 885 final, 15.12.2011.

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0885&from=EN>

10. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drozdova O.I. Analysis of main points of the EU energy roadmap 2050 // *Promyshlennaya teplotekhnika*. – 2012, V. 34, N 6. – P. 64–69. (Ukr.)

11. *RE-Thinking 2050*. A 100% Renewable Energy Vision for the European Union. EREC, 2010. [http://www2.warwick.ac.uk/fac/soc/csgr/green/foresight/energyenvironment/2010\\_erec\\_rethinking\\_2050.pdf](http://www2.warwick.ac.uk/fac/soc/csgr/green/foresight/energyenvironment/2010_erec_rethinking_2050.pdf)

Получено 11.01.2016

Received 11.01.2016

УДК 620.92,93; 621.311.24

## ГЕОТЕРМАЛЬНА ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЯ В УМОВАХ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНОЇ ГЕОСИСТЕМИ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Кравченко І. П.

*Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вул. Червоногвардійська, 20а, 02094, м. Київ, Україна*

В статті досліджені нетрадиційні для української геотермальної енергетики способи генерації електричної енергії з використанням низькотемпературного теплового потенціалу, притаманного гідрогеологічному середовищу території України, з застосуванням низькокиплячих робочих тіл, а також комбінованого способу з використанням природного газу, розчиненого в термальній воді.

В статье исследованы нетрадиционные для украинской геотермальной энергетики способы генерации электрической энергии с использованием низкотемпературного теплового потенциала, присущего гидрогеологической среде территории Украины, с применением низкокипящих рабочих тел, а также комбинированного способа с использованием природного газа, растворенного в термальной воде.

The article explored non-traditional for Ukrainian geothermal energetics able to generate-of electricity using low-potential heat, inherent at hydrogeological environment in Ukraine, with the use of low-boiling working fluids, as well as the combined method of using natural gas, dissolved in the thermal water.

Бібл. 4, табл. 2, рис. 8.

**Ключові слова:** геотермальна енергетика, термальна вода, теплообмінник, природний газ, газопоршневий двигун, електроенергія, генерація, низькокипляче робоче тіло, турбіна, турбінний цикл.

НРТ – низькокипляче робоче тіло;

ГПД – газопоршневий двигун внутрішнього згоряння;

ГЦС – геотермальна циркуляційна система (підземний колектор–видобувна свердловина– теплообмінник–поглинальна свердловина–підземний колектор).

### Вступ

Геотермальна енергетика реалізується, як правило, в одному з двох проявів: або в генерації промислової теплової енергії для опалення і гарячого водопостачання, або в генерації електричної енергії. В окремих випадках можливі одночасно обидва прояви. Перший вид генерації в Україні, хоча і не масово, все ж представлений декількома діючими проектами і науково достатньо ґрунтовно відпрацьований. Другий же напрямок, за винятком одного малопотужного дослідного зразка в Криму, навіть не стоїть на порядку денного ні в планових ні в енергетичних відомствах. Причиною цього є, по-перше, дійсно об'єктивні причини, зокрема відсутність природних паротерм або, хоча б, термальної води з температурою, відчутно більшою температури кипіння, а також відсутність коштів на геоло-

гічну розвідку та на бурові роботи. По-друге, це вкрай невинуваті суб'єктивні причини: відсутність необхідного обладнання, некондиційність термальних вод на відміну від зарубіжних умов (РФ, Італія, США, Філіппіни і т.д.), відсутність галузі як такої, нерентабельність технології, відсутність спеціалістів і т.і. Насправді, це небажання, а часто і супротив, галузевих і управлінських структур запроваджувати цю нову галузь через корпоративний інтерес. При цьому, вказані об'єктивні причини перебільшуються до рівня невинуватих проблем, а намагання наукових установ не знаходять підтримки. Зокрема, в Україні є достатній і науковий і промисловий потенціал для створення власного обладнання будь-якої складності.

В даній роботі на прикладі конкретного ро-

довища обґрунтовується реальна можливість прямої генерації електричної енергії як з використанням низькопотенційного геотермального теплоносія і турбінного циклу на НРТ, так і з використанням розчиненого природного газу, який є вуглеводнем з вмістом метану 83...89 % [1]. В роботі досліджені усі можливі способи використання цих складових геотермального флюїду — води і розчиненого у ній природного газу, для генерації електричної енергії.

### *Передумови застосування турбінної електрогенерації на НРТ*

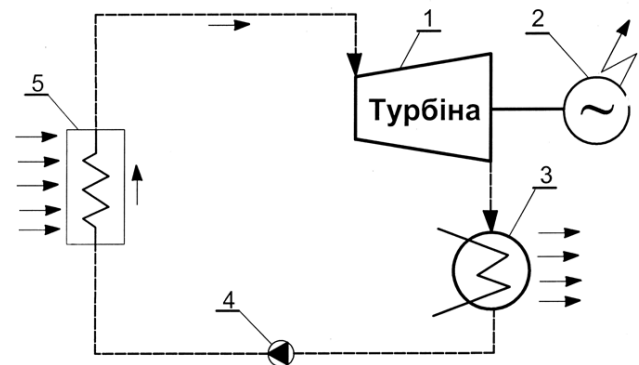
Для переважної більшості існуючих турбінних циклів в галузі електрогенерації основним робочим тілом є пароводяна суміш, як найдешевший теплоносій між джерелом теплоти і турбіною. Вода має можливість задовольнити усі розрахункові параметри термодинамічного циклу в контурі за умови її нагрівання до відповідної цим розрахункам температури, необхідної для кипіння і пароутворення.

В геотермальній енергетиці таке нагрівання могло б відбуватись від нагрітого природним шляхом геотермального флюїду в теплообмінному обладнанні. На жаль, в жодному родовищі України геотермальний флюїд не є парою, а лише водою, причому в більшості з температурою, що не перевищує 100 °С, і не здатний забезпечити необхідних параметрів для пароутворення, навіть якщо вона дещо вища за температуру кипіння. Світова наука і практика, в тому числі українська, знайшли вихід із такого становища [2]. Знайдені такі рідини, температура кипіння яких значно нижча за температуру геотермального теплоносія. Ними виявилась достатньо велика кількість як чистих газів, так і суміші деяких з них, агрегатний стан яких за кімнатної температури являє рідину, а кипіння відбувається в діапазоні від 35 до 70 °С [3]. Таким робочим тілом присвоїли аббревіатуру НРТ — низькокиплячі робочі тіла. В більшості ці гази є вуглеводнями [4]. Якщо таким тілом заповнити контур турбінної установки і довести його температуру до кипіння з високими параметрами пари, турбіна почне працювати в штатному режимі. Джерелом тепло-

ти для таких установок може бути і геотермальний флюїд.

### *Процеси і системи геотермальної електрогенерації на НРТ*

В даній роботі, із відомих, вибраний газ із найнижчою температурою кипіння — 35.7 °С, і найкращими термодинамічними показниками, це н-пентан. Фреонові НРТ, що мають ще нижчу температуру кипіння, але за іншими термодинамічними параметрами поступаються н-пентану, не розглядаються. Узагальнена схема турбінної електрогенеруючої установки на НРТ має такий вигляд (рис.1). Принцип її дії у варіанті циклу Ренкіна є загальновідомим і не потребує пояснень.



**Рис.1. Узагальнена схема турбінного контура електростанції на НРТ:**

- 1 – турбіна; 2 – електрогенератор;**
- 3 – конденсатор з відводом тепла;**
- 4 – живильний насос;**
- 5 – теплообмінник-парогенератор.**

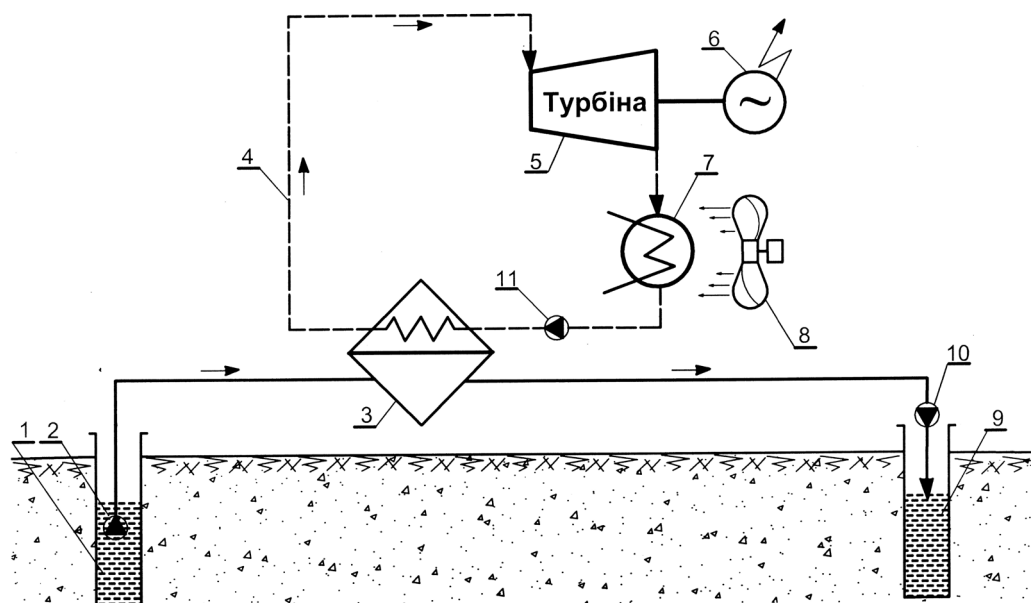
При використанні такого контура в геотермальній енергетиці з нагріванням і випаровуванням НРТ геотермальною теплою ця схема залишається незмінною (рис. 2), тільки парогенератором виступає геотермальний теплообмінник-утилізатор (далі — теплообмінник ГЦС), в другому контурі якого створюються умови, що дозволяють максимально ефективно передавати теплоту від геотермального флюїду робочому тілу, яке із стиснутої насосом рідини перетворюється у перегріту пару високого тиску. Це відбувається

завдяки тому, що температура геотермальної води, в залежності від родовища, в 2...3, а то і в більше разів, перевищує температуру кипіння НРТ при вибраному початковому тиску.

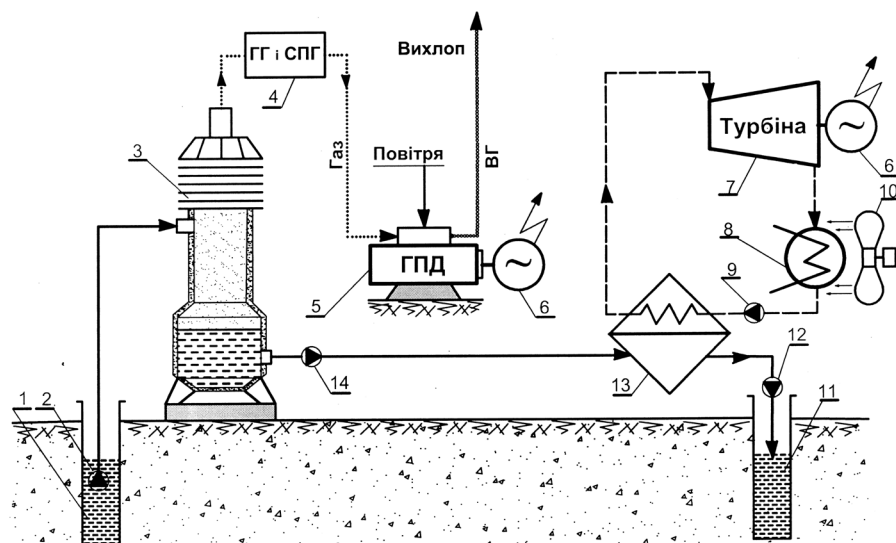
У випадку, якщо геотермальний флюїд ще й містить у собі розчинений природний газ, постає завдання його вилучення з води до того, як вона надійде у теплообмінник. Для цього необхідно включити в схему спеціальний сепаратор, будова якого розроблена і запатентована автором [5], а також газопоршневий двигун внутрішнього згоряння (ГПД) і додатковий електрогенератор, що приводиться в дію цим двигуном. Тепер процеси в установці протікають таким чином: газовмісна термальна вода, піднята із свердловини 1 (рис. 3) видобувним насосом 2, надходить під певним тиском у сепаратор 3, де під дією відцентрових сил і гравітації на воду та вільного розширення і витяжного насоса на газ, останній відділяється від води, яка надходить у теплообмінник 13, де віддає теплоту робочому тілу турбінного контура. Вилучений і накопичений в газгольдері та висушений в системі підготовки 4 газ, подається у ГПД, який приводить у дію електрогенератор, що незалежно від генератора з

турбінним приводом також виробляє електричну енергію, після чого викидається у атмосферу вже у вигляді відпрацьованих (далі – вихлопних) газів. Таким чином, із термального флюїду корисно використані усі його складові, причому усі складові використані для генерації тільки електричної енергії. (При реальному створенні такої електрогенеруючої установки в схемі може бути тільки один генератор, що приводиться в дію одночасно турбіною і ГПД, співвісно сполученими з генератором та обладнаними системою синхронізації частоти обертання, що не входить у розгляд в даній статті). На жаль, у такої схеми є істотний недолік: великі обсяги вихлопних газів ГПД викидаються в атмосферу у вигляді скидної теплоти з температурою, близькою до 500 °С. Як можна використати і цей тепловий потенціал?

Наявність в схемі турбінного контура дозволяє це зробити ефективно, до того ж з відчутним збільшенням к.к.д. самого турбінного контура та збільшенням обсягів виробленої з його допомогою електричної енергії. Це досягається використанням теплоти вихлопних газів для додаткового підігріву термальної води або перегріву пари робочого тіла турбіни.



**Рис. 2.** Узагальнена технологічна схема паротурбінної електрогенеруючої установки на геотермальній циркуляційній системі.

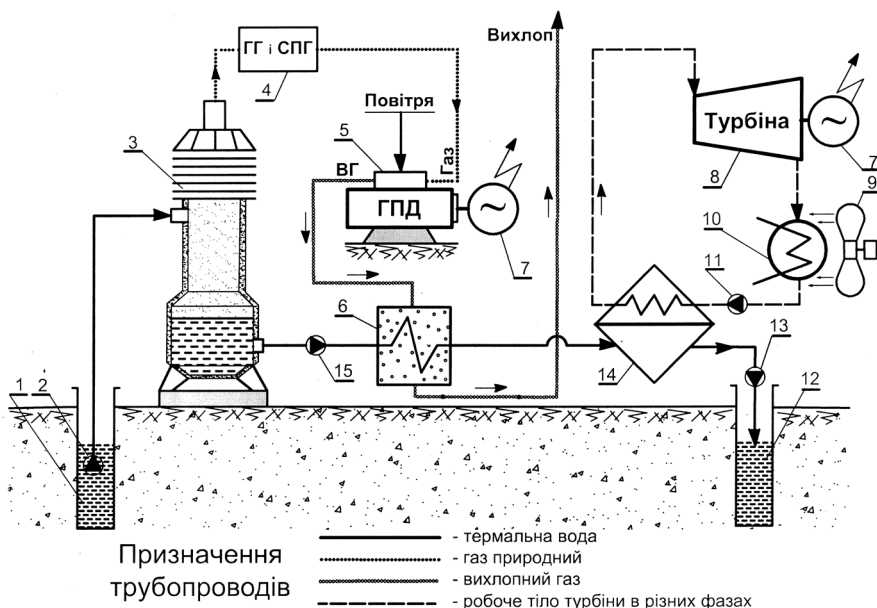


**Рис. 3. Схема комбінованої електрогенеруючої установки на ГЦС, теплоносій якої насичений природним газом, з вихлопом ГПД у атмосферу.**

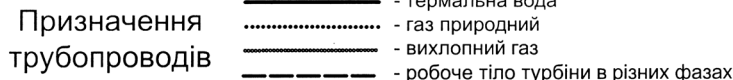
Використати потенціал вихлопних газів можна двома способами:

1. Пропускати їх через ще один теплообмінник, вторинний контур якого включений між сепаратором і теплообмінником ГЦС. Тобто, вихлопні гази догрівають термальну воду до більшвисокої температури. Така схема зображена на рис. 4.

2. Пропускати вихлопні гази через той же додатковий теплообмінник, але його вторинний контур включити безпосередньо в турбінний контур за виходом робочого тіла із теплообмінника ГЦС. Тобто, використати як класичний пароперегрівач, що часто використовується у пароводяних турбінних схемах. Така схема зображена на рис. 5.



**Рис. 4. Схема комбінованої електрогенеруючої установки з передачею скидної теплоти ГПД в теплообмінник ГЦС.**



*Рис. 5. Схема комбінованої електрогенеруючої установки з передачею скидної теплоти ГПД безпосередньо в робочий контур турбіни.*

При цьому, в обох випадках теплова потужність, яка передається від вихлопних газів, є однаковою і визначається за класичною формулою

$$Q_{\text{вх.}} = G_{\text{вх.}} \cdot C_p \cdot (t_{\text{вх.}} - t_{\text{вих.}}) \cdot \eta_{\text{мо}}, \quad (1)$$

де:

$$Q_{\text{вз}} - \text{теплова потужність вихлопних газів, кДж/кг} \cdot \text{К;}$$

$G_{вг}$  – витрати вихлопних газів на підігрів теплоносія, кг/сек;

$C_{p_{\text{ср}}}$  – теплоємність вихлопних газів при середній температурі, 550 °С, кДж/кг·К;

$t_{вх.гх.}$  – температура вихлопних газів на вході в теплообмінник;

$t_{\text{вх. вих.}}$  – температура вихлопних газів на виході з теплообмінника, К;

 $\eta_{mo}$  – к.к.д. теплообмінника-утилізатора,

але точка прикладання цієї потужності різна: у першому способі вона використовується в ГЦС для додаткового підігрівання геотермальної води; в другому — на перегрів безпосередньо робочого тіла. В цьому разі ефективність тепломасообміну вихлопних газів з робочим тілом турбіни значно вища, оскільки в першому випадку термальна вода з первинного контура

теплообмінника ГЦС спочатку передає тепло-  
ту проміжному теплоносію, наприклад воді, у  
вторинному контурі, а вже вторинний контур  
передає робочому тілу, яке на цій ділянці зна-  
ходиться частково в рідкому стані, а частково в  
стані пари. У другому ж випадку вихлопні гази  
передають теплоту безпосередньо робочому тілу  
в турбінному контурі, причому вже у стані пари  
перед входом у турбіну. При цьому кількість  
переданої теплоти більша завдяки більшій  
різниці температур – виразу в дужках формули  
(1), та сприятливішому значенню виразу  $G_{\text{вг.}} \cdot C_{\text{рв.г.}}$   
перед дужками і, навіть, вищому к.к.д. додат-  
кового теплообмінника, порівняно з геотермаль-  
ним.

Для вибору найбільш доцільної схеми і, відповідно, найбільш ефективного методу, необхідно визначити початкові умови і показники та виконати порівняльний термодинамічний аналіз усіх 3-х розглянутих варіантів на предмет енергетичної ефективності кінцевого результату.

## 1. Вихідні дані, отримані з геологічних матеріалів:

- Об'єкт – свердловина № 2 на Бухалівському

піднятті Гадяцького газоконденсатного родовища Полтавської області;

- Параметри свердловини: термоводоносні горизонти 4950 і 5040 м, температура термальної води 120 °С, газовий фактор води відповідно 5,20 і 0,54, дебет кожного з горизонтів 523,2 м³/доб., тиск в точці забору води із свердловини – 10 бар;

- Сумарний дебіт води 523,2 м³/доб. · 2 = 1046,4 м³/доб.;

- Сумарний газовий фактор  $5,20 \text{ м}^3/\text{м}^3 + 0,54 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 5,74 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;

- Добовий дебіт газу  $1046,4 \text{ м}^3/\text{доб.} \cdot 5,74 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 6006,4 \text{ м}^3/\text{доб.}$ ;

- З урахуванням вмісту горючих складових у природному газі 94,12 % дійсна кількість газу буде 5653,2 м³/доб. або **235,6 м³/год**;

- З урахуванням, що щільність води при температурі 120 °С і тиску 10 бар дорівнює 943 кг/м³, отримаємо  $1046,4 \text{ м}^3/\text{доб.} \cdot 943 \text{ кг/м}^3 = 989755,2 \text{ кг/доб.} = 41114,8 \text{ кг/год.} = \mathbf{11,4 \text{ кг/сек}}$ ;

- Коефіцієнт корисної дії електрогенератора = 0,96.

## 2. Вибір обладнання.

Критерієм для вибору газопоршневого двигуна (ГПД) є годинне споживання ним газу, яке в свою чергу визначається надходженням його з термальної води, що в даному прикладі дорівнює **235,6 м³/год**. За даними каталогу енергетичного устаткування «Турбіни і дизелі» та проспекту АО «Первомайськдизельмаш» під такий параметр підходять, наприклад, наступні ГПД (табл. 1):

Таблиця 1. Перелік ГПД за параметрами, близькими до необхідних

| №№<br>п/п | Фірма                 | Модель          | Потужність,<br>кВт | Витрати газу<br>на ГПД: м³ на<br>год /відпр.газу,<br>кг/год | Температура<br>відпрацьованого<br>газу, °С |
|-----------|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1         | <b>Cuascor</b>        | <b>SFGLD480</b> | <b>838</b>         | <b>233,5</b>                                                | <b>445</b>                                 |
| 2         | Первомайськ-дизельмаш | ДВГА-315        | 315                | 84/1840                                                     | 550                                        |
| 3         | - « -                 | ДВГА-630        | 630                | 167/3651                                                    | 550                                        |

Найбільш відповідним цьому є двигун поз. 1 компанії Cuascor (Іспанія) моделі SFGLD480 потужністю 838 кВт при температурі вихлопних газів 445 °С з різницею необхідного для споживання і наявного у воді газу усього +2,1 м³ на годину. Але з огляду на можливі організаційні перешкоди та на вартість, доцільніше використовувати вітчизняне обладнання. В представленій добірці серед вітчизняних зразків такого одиничного агрегату немає, хоча в сумі обидва наявних двигуна поз. 2 і поз. 3

відповідають поставленим умовам:

- Потужність двигуна ДВГА-315 = 315 кВт;

- Потужність двигуна ДВГА-630 = 630 кВт

**Разом = 945 кВт**

І хоча їх сумарне споживання газу є дещо більшим (251 м³/год), вони в парі зможуть працювати в ненапруженому режимі зі спожи-

ванням 235,6 м³/год. Тим більше, що при тій же кількості спожитого газу два українських двигуна розвивають на 107 кВт більшу потужність ніж SFGLD 480. Тому на схемах вони зображені як один двигун, але усі розрахунки ведуться по схемі двох двигунів.

## 3. Умови здійснення тепломасообмінних процесів за варіантами.

### Перший варіант (рис. 3)

Термальна вода, після сепарації з неї газу, проходить через геотермальний теплообмінник і віддає теплоту другому контуру для нагрівання і випаровування н-пентану. Вилучений природний газ подається в систему живлення привідного газопоршневого двигуна (ГПД) і у вигляді вихлопних газів з температурою 550 °С викидається у атмосферу.

### Другий варіант (рис. 4)

Термальна вода, після сепарації з неї газу, спочатку проходить через додатковий теплообмінник, встановлений в контурі геотермального теплоносія, у якому догрівається відпрацьованими газами ГПД до більш високої температури, потім через первинний контур вже геотермального теплообмінника, де віддає теплоту для нагрівання і випаровування н-пентану.

### Третій варіант (рис. 5)

Термальна вода і вилучений газ проходять такий же шлях як і в першому варіанті, а відпрацьовані гази подаються в додатковий, як у другому варіанті, теплообмінник, але встановлений в розриві турбінного тракту на виході з другого контура термального теплообмінника, і в ньому відбувається перегрів пари вже раніше випарованого н-пентану. При цьому, відпрацьовані гази, що мають температуру 550 °С, попередньо охолоджуються у спеціальному змішувачі, до температури 280 °С, що не перевищує температуру самозаймання пентану (287 °С) одним з двох варіантів. Перший – розбавленням атмосферним повітрям в кількості 2,3 кг/сек, другий – рециркуляцією відпрацьованих вихлопних газів після їх виходу з перегрівача 10 рис. 5 в кількості 2,97 кг/сек. (Розрахунки не наводяться).

### Аналіз термодинамічних показників процесу

Розрахунки внутрішніх термодинамічних параметрів турбінного процесу отримані за допомогою стандартної діаграми станів н-пентану в залежності від тиску і температури на комп'ютері за програмою Інституту технічної теплофізики НАН України і за участю спів-робітників докт. техн. наук Білеки Б.Д. і Кабкова В.Я. у вигляді табличних результатів (за браком місця не наводяться) та відповідних їм діаграм термодинамічних циклів Ренкіна (рис. 6, 7, 8).

#### 1. Термодинамічні розрахунки

Теплова потужність, отримана від термальної води

В усіх варіантах схеми теплової потужності, віддана в контур н-пентану безпосередньо термальною водою через геотермальний теплообмінник, визначається за відомою формулою:

$$Q_{тв.} = G_{тв.} \cdot C_{p_{тв.}} \cdot (t_{тв.вх.} - t_{тв.вих.}) \cdot \eta_{утил.} \quad (2)$$

де:

$Q_{тв.}$  – теплова потужність, віддана термальною водою тракту НРТ, кДж/кг · К;

$G_{тв.}$  – витрати термальної води, кг/с;

$C_{p_{тв.}}$  – теплоємність термальної води на вході в геотермальний теплообмінник, кДж/кг К.;

$t_{тв.вх.}$  – температура термальної води на вході в геотермальний теплообмінник, К;

$t_{тв.вих.}$  – температура термальної води на виході з геотермального теплообмінника, К;

$\eta_{утил.}$  – к.к.д. теплообмінника-утилізатора (міжконтурний тепломасообмін),

і складає

$$Q_{тв.} = 11,4 \text{ кг/сек} \cdot 4,292 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К} \cdot (393 \text{ К} - 326 \text{ К}) \cdot 0,9 = 3278,23 \text{ кДж/сек.}$$

Для першого і третього з варіантів така потужність і залишається в подальших розрахунках. У другому з варіантів до цієї потужності додається потужність, отримана геотермальним теплообмінником від відпрацьованих газів, що визначається наступним розрахунком.

Згідно з паспортними даними, двигуни, вибрані для даної схеми, виділяють відпрацьованих (вихлопних) газів:

По двигуну ДВГА-315: 2180 кг/год = 0,61 кг/сек;

По двигуну ДВГА-630: 4160 кг/год = 1,15 кг/сек;

**Разом по 2-м двигунам: = 1,76 кг/сек**

Теплова потужність, яку можна отримати від відпрацьованих газів ( $Q_{гз.}$ ), становить:

При віддачі в геотермальний теплообмінник (другий варіант) за формулою (2):

$$Q_{гз.} = 1,76 \text{ кг/сек} \cdot 1 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К} \cdot (823 \text{ К} - 405 \text{ К}) \cdot 0,9 = 662,11 \text{ кДж/сек.}$$

При віддачі в теплообмінник пентанового контура (третій варіант) за тією ж формулою

$$Q_{гз.} = 1,76 \text{ кг/сек} \cdot 1 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К} \cdot (823 \text{ К} - 365 \text{ К}) \cdot 0,9 = 725,47 \text{ кДж/сек.}$$

Таким чином, **сумарна потужність**, яку отримує турбінний контур на НРТ, як від термальної води, так і від вихлопних газів, за усіма варіантами складає:

за першим варіантом: = 3278,23 кДж/сек;

за другим варіантом:

3278,23 кДж/сек + 662,11 кДж/сек = 3940,34 кДж/сек;

за третім варіантом:

3278,23 кДж/сек + 725,47 кДж/сек = 4003,7 кДж/сек,

що і використано далі в комп'ютерних розрахунках.

2. Розрахунок потужності електричної енергії, що генерується двома двигунами за рахунок спалювання газу:

По двигуну ДВГА-315:

$N_{\text{ел.}} = P_{\text{дв.}} \cdot \text{к.к.д.}_{\text{ген.}} = 315 \text{ кВт} \cdot 0,96 = 302,4 \text{ кВт};$

По двигуну ДВГА-630:

$N_{\text{ел.}} = P_{\text{дв.}} \cdot \text{к.к.д.}_{\text{ген.}} = 630 \text{ кВт} \cdot 0,96 = 604,8 \text{ кВт}$

**Разом по 2-м двигунам: = 907,2 кВт**

3. Розрахунок потужності електричної енергії, яку можна додатково отримати за рахунок генерації турбоелектрогенератором, турбіна якого працює на НРТ, за схемами (рис. 3, 4, 5).

З результатів обчислення внутрішніх термодинамічних показників турбінного циклу і отриманих відповідних значень корисної потужності турбіни за усіма варіантами (в підписах під рисунками 6, 7, 8), потужність електричної енергії, що генерується електрогенератором за допомогою турбіни по кожному з варіантів складає:

1-й варіант:  $48,2 \text{ кВт} \cdot 0,96 = 46,272 \text{ кВт};$

2-й варіант:  $103,4 \text{ кВт} \cdot 0,96 = 99,264 \text{ кВт};$

3-й варіант:  $171,2 \text{ кВт} \cdot 0,96 = 164,352 \text{ кВт}.$

Таким чином, в результаті виконаних розрахунків встановлені показники, які дозволяють порівняти ефективність використання геотермальної теплоти, як додаткового джерела для генерації електричної енергії, в комбінації з теплою вихлопних газів двигуна внутрішнього згоряння, який за потужністю можна вважати основним джерелом, в залежності від точки прикладання теплоти вихлопних газів до тракту НКР турбіни:

Таблиця 2. Порівняльні показники отриманої електричної потужності

| № варіантів | Електрична потужність, отримана за допомогою ГПД, кВт | Електрична потужність, отримана від турбінного контура, кВт | Загальна електрична потужність, кВт | Додатковий приріст електричної енергії, % |                |
|-------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|----------------|
|             |                                                       |                                                             |                                     | До загального обсягу                      | До ГПД джерела |
| 1           | 907,2                                                 | 46,272                                                      | 953,472                             | 4,85                                      | 5,10           |
| 2           | 907,2                                                 | 99,264                                                      | 1006,464                            | 9,86                                      | 10,94          |
| 3           | 907,2                                                 | 164,352                                                     | 1071,552                            | 15,34                                     | 18,12          |

### **Результати аналізу виконаних розрахунків показали:**

1. Застосування першого варіанту недоцільне через втрату теплового потенціалу вихлопних газів;

2. У другого варіанта теплота відпрацьованих газів не скидається, але ефективність її використання недостатньо висока через неефективний двоступеневий тепломасообмін між вихлопним газом з витратами 4.06...4.73 кг/сек і водою з витратами 11.4 кг/сек., яка в свою чергу випаровує робоче тіло з витратами 5.3 кг/сек. Підвищення температури термальної води в теплообміннику ГЦС на 5...7 градусів відчутно не впливає на температуру пари в турбінному контурі.

3. Третій варіант, коли безпосередньо на робоче тіло в турбінному контурі, що вже знаходиться в стані нагрітої пари, з витратами 5 кг/сек і початковою температурою 48 °С діє зовнішній теплоносіє з температурою 280 °С, є найбільш раціональним для практичного застосування.

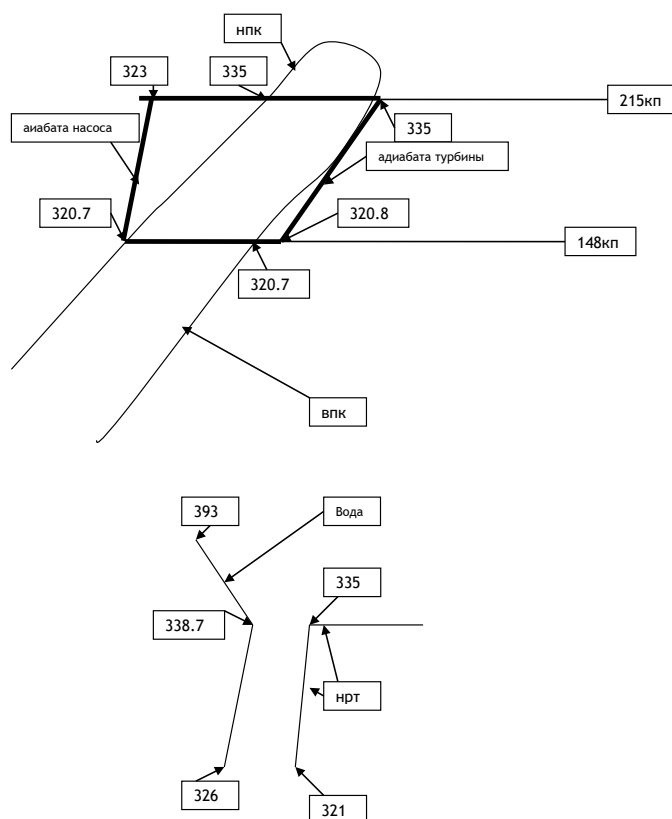
### **Висновки**

Аналіз можливості застосовувати в Україні геотермальні технології з генерації електричної енергії з приводом електрогенераторів від турбін, що працюють на низькокиплячих робочих тілах, не тільки підтвердив таку можливість, але й показав найнагальнішу потребу їх застосування навіть на тих родовищах, вода яких не містить розчиненого газу. В Україні немає жодної такої

установки, тому для масштабної реалізації таких технологій необхідне створення пілотного дослідно-промислового зразка, базовим об'єктом якого пропонується розглянутий в статті Гадяцький варіант в Полтавській області, як достатньо перспективний для всеосяжних наукових і впроваджувальних досліджень.

Щодо можливості генерації електричної

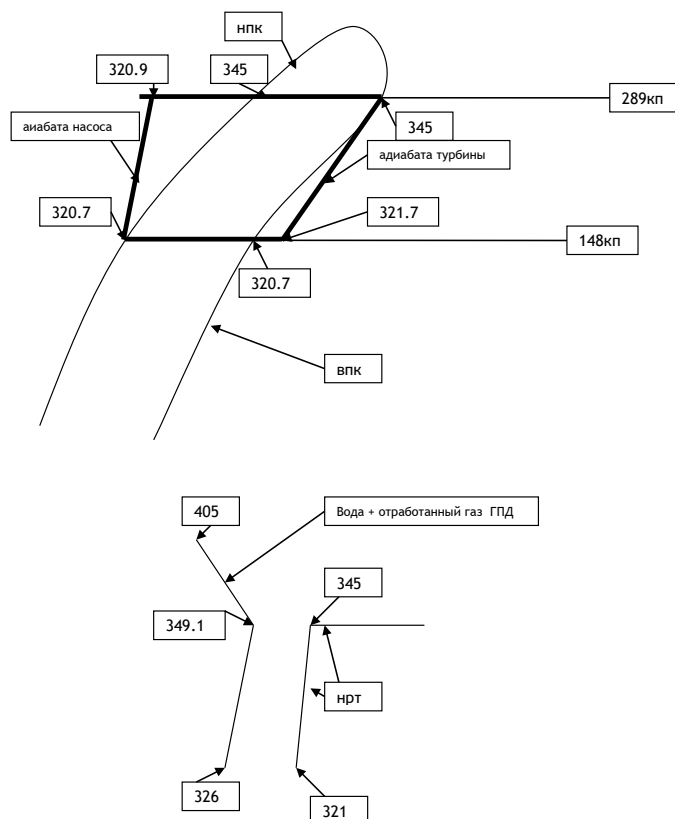
енергії з використанням природного газу, розчиненого в термальній воді, то даними дослідженнями підтверджено, що це вже не є суто науковою проблемою і вимагає тільки конструкторських і інших інженерних рішень та проектно-кошторисних розрахунків по кожному конкретному проекту і відповідних капітальних вкладень.



**Рис. 6.** Діаграма термодинамічного циклу для НРТ н-пентан при використанні термальної води в тракту гетермального теплообмінника в якості єдиного гріючого і випаровуючого середовища для тракту н-пентану, отримана за підрахунками

Потужність турбіни НРТ – 75,6 кВт  
Корисна потужність турбіни – 48,2 кВт  
Витрати НРТ – 5,0 кг/с

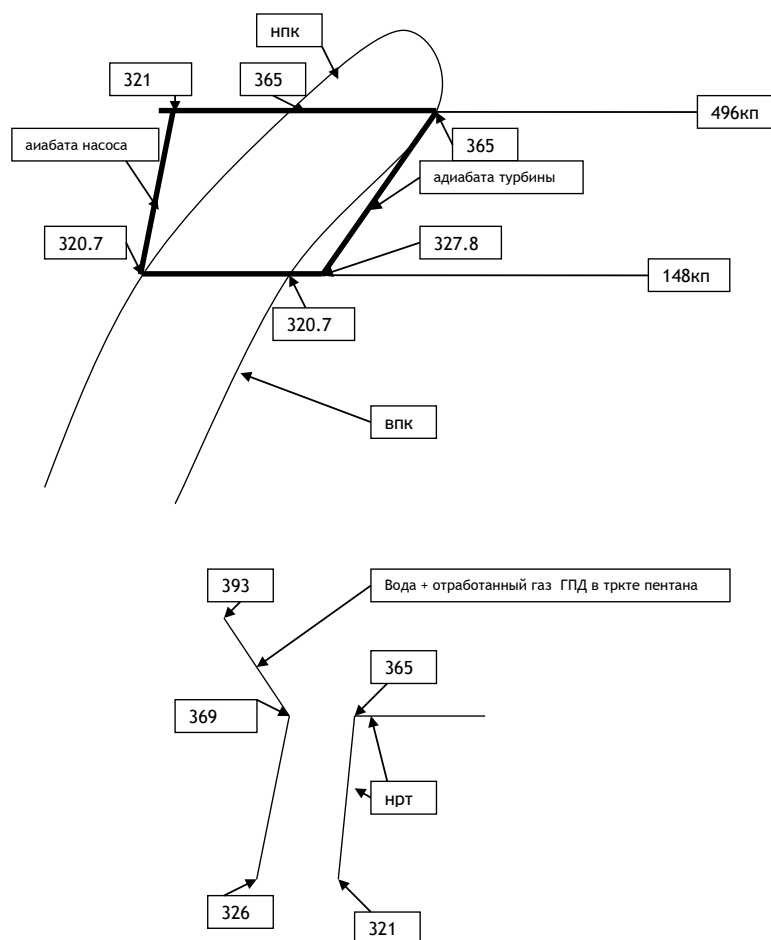
Нпк – нижня погранична крива,  
Впк – верхня погранична крива.



**Рис. 7.** Діаграма термодинамічного циклу для НРТ н-пентан при використанні термальної води, додатково підігрітої відпрацьованим газом ГПД, в якості нагрівуючого і випаровуючого середовища в тракту н-пентану, отримана за підрахунками

Потужність турбіни НРТ – 133,6 кВт  
Корисна потужність турбіни – 103,4 кВт  
Витрати НРТ – 5,3 кг/с

Нпк – нижня погранична крива,  
Впк – верхня погранична крива.



**Рис. 8. Діаграма термодинамічного циклу для НРТ н-пентан при використанні термальної води в тракті геотермального теплообмінника в якості нагрівачого середовища і відпрацьованого газу ГПД в тракті н-пентану в якості випаровуючого середовища, отримана за підрахунками**

**Потужність турбіни НРТ – 204,9 кВт  
Корисна потужність турбіни – 171,2 кВт  
Витрати НРТ – 5,3 кг/с**

**Нпк - нижня погранична крива,  
Впк – верхня погранична крива.**

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Отчёт по НИР «Оценка перспектив использования геотермальных газосодержащих вод Украины для децентрализованного энерго-снабжения»*, № госрегистрации 0101u 002849, 2001, г. Киев.

2. *Долинский А.А., Клименко В.Н., Билека Б.Д., Васильев Е.П. Применение двухконтурных паротурбинных энергоустановок на низкикипящих*

*рабочих телах в условиях геотермальных месторождений Украины/ Промышленная теплотехника, Киев, 2000, т.22, № 3, с. 30-42.*

3. *Билека Б.Д. Утилизация сбросной теплоты ГПА в энергоустановках с низкикипящими рабочими телами/Б.Билека, Е.Васильев, В.Избаш и др./Газотурбинные технологии, 2002.– № 5.– С.6-10.*

4. *Б.Д. Билека //Низкикипящие вещества для*

работы в качестве рабочих тел в теплоутилизирующих энергоустановках на компрессорных станциях магистральных газопроводов//Промышленная теплотехника, Киев, 2003, № 3, с. 33-35.

5. Кравченко І.П. «Сепаратор для відокремлення газу від рідини», патент України на винахід № 82692, бюл. № 9 від 12.05.2008 р.

## GEOTHERMAL ELECTRIC GENERATION IN LOW-GRADE CONDITIONS POTENTIAL OF GEOSYSTEM OF UKRAINE

**Kravchenko I.P.**

Institute of Renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Chervonogvardijska, 20A, Kyiv, 02094, Ukraine

In the article by science substantiated of opportunity, expediency, and the need using decommissioned oil and gas wells and deposits for convert them into geothermal and use them in steam-turbine plants operating on low boiling working fluid to generate electricity. Showed the concrete example and a generic calculation such of electric station. In addition, the article proves the feasibility and the technical ability to generate electricity from natural gas dissolved in thermal waters most of Ukrainian deposits, confined to the deposits of hydrocarbons - oil and gas. In order to separate gas from water or petroleum it is proposed to use gas separator, designed and the patented author this article. The author also offer a specific gas deposit and a particular well for the device pilot prototype power plant operating on low boiling working fluid.

References 5, tables 2, figures 8.

**Key words:** geothermal energy, thermal water, heat exchanger, natural gas, gas-engine, electricity generation, low-boiling working fluid, a turbine, turbine cycle.

1. *The report on the research project "Assessment of the prospects of using of geothermal of gas-comprising waters of Ukraine for decentral electric power supply"*, № state registration 0101u 002 849, 2001, Kiev;

2. *Dolinskiy A.A., Klimenko V.N., Bileka B.D., Vasilyev E.P.* Application two-circuit steam-turbine power plants with low-boiling working fluids in the conditions of geothermal deposits in Ukraine *Promyshlennaja teplotekhnika*, Kyiv, 2000, t. 22, №3, P. 30-42;

3. *Bileka B.D.* Recycling of reset-heat from gas-compressor machines into energy equipment with low-boiling working fluids, *Gasoturbinnye tekhnologii*, 2002, №5, P. 6-10;

4. *Bileka B.D.*, Low-boiling substances for using as working fluids in heat-utilizing equipment, in energy-equipments of main gas pipelines, *Promyshlennaja teplotekhnika*, Kyiv, 2003, №3, P. 33-35;

5. *Kravchenko I.P.* "The separator for separating gas from liquid", Ukraine patent for invention № 82692, bulletin №9, 12.05.2008.

*Получено 30.10.2015*

*Received 30.10.2015*

УДК 621.383.4

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОММУНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Карпенко Д. С., Дубровская В.В., канд. техн. наук, Шкляр В.И., канд. техн. наук

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
Институт энергосбережения и энергоменеджмента, ул. Борщаговская, 115, Киев, 03056, Украина*

Побудовано математичну модель роботи фотоелектричного модуля з водяною системою охолодження його поверхні. Проведено чисельне моделювання в програмному середовищі SolidWorks та визначено оптимальні конструктивні характеристики системи охолодження.

Построена математическая модель работы фотоэлектрического модуля с водяной системой охлаждения его поверхности. Проведено численное моделирование в программной среде SolidWorks и определены оптимальные конструктивные характеристики системы охлаждения.

A mathematical model of the solar module with a water cooling system of its surface was built. Numerical modeling with software SolidWorks and the optimal structural characteristics of the cooling system were determined.

Библ. 2, рис. 3.

**Ключевые слова:** математическая модель фотоэлектрического модуля, система охлаждения.

$G$  – расход воды, кг/с;

$I_{K3}$  – ток короткого замыкания, А;

$k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;

$n$  – коэффициент идеальности;

$P$  – уровень солнечной радиации на поверхности модуля, Вт;

$q$  – заряд электрона, Кл;

$S$  – расстояние между осями труб, м;

$T$  – температура, К;

$t_{cp}$  – средняя температура поверхности, °С;

$t_{MAX}$  – максимальная температура поверхности, °С;

$t_{MIN}$  – минимальная температура поверхности, °С;

$U_{xx}$  – напряжение холостого хода, В;

$u_{oc}$  – нормированное напряжение холостого хода, В;

$\Delta t$  – разница между максимальной и минимальной температурой поверхности, °С;

КПД – коэффициент полезного действия;

ФЭП – фотоэлектрический преобразователь.

Формирование конкурентных рынков электрической и тепловой энергии в Украине является одним из важнейших принципов существования эффективной энергетической отрасли страны, и, следовательно – ее экономики. Интегрирование солнечной энергетики в общую структуру энергетической системы Украины является актуальным вопросом на сегодняшний день, поскольку основным свойством данного источника энергии является его непостоянство во времени. Однако, при наличии инструментария по высокоточному прогнозированию генерации электрических и тепловых мощностей, солнечная энергетика могла бы быть одним из основных источников возобновляемой энергии в

структуре энергобаланса страны.

Солнечный потенциал на территории Украины достаточен для его использования и преобразования в электрическую энергию с помощью фотоэлектрических установок. Учитывая уменьшение цены на фотоэлектрические системы и государственные механизмы стимуляции использования нетрадиционных источников энергии, фотоэлектрические установки становятся доступными для их использования в коммунальном хозяйстве.

В настоящее время львиная доля солнечных батарей имеют достаточно низкий КПД, который находится в диапазоне 10...20 %, поэтому вопрос о повышении эффективности использования

энергии солнца является одним из важнейших в данной области альтернативной энергетики.

Эффективность солнечных элементов определяется коэффициентом полезного действия [1]:

$$\eta = \frac{ff \cdot I_{\text{кз}} \cdot U_{\text{хх}}}{P}$$

Коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики рассчитывается по эмпирической формуле:

$$ff = \frac{u_{\text{ос}} - \ln(u_{\text{ос}} + 0,72)}{u_{\text{ос}} + 1},$$

где

$$u_{\text{ос}} = \frac{q}{n \cdot k \cdot T} \cdot U_{\text{хх}}.$$

Из уравнений видно, что при увеличении температуры солнечного элемента, снижается его коэффициент заполнения, а в результате и КПД. Критической температурой для кремниевых фотоэлементов является 85 °С [2]. Поэтому, возникает необходимость в охлаждении фотоэлемента для поддержания некоторой температуры полупроводника, при которой КПД будет максимальным, а при использовании полученной тепловой энергии повышается и общий КПД установки.

**Цель работы.** Определить оптимальные

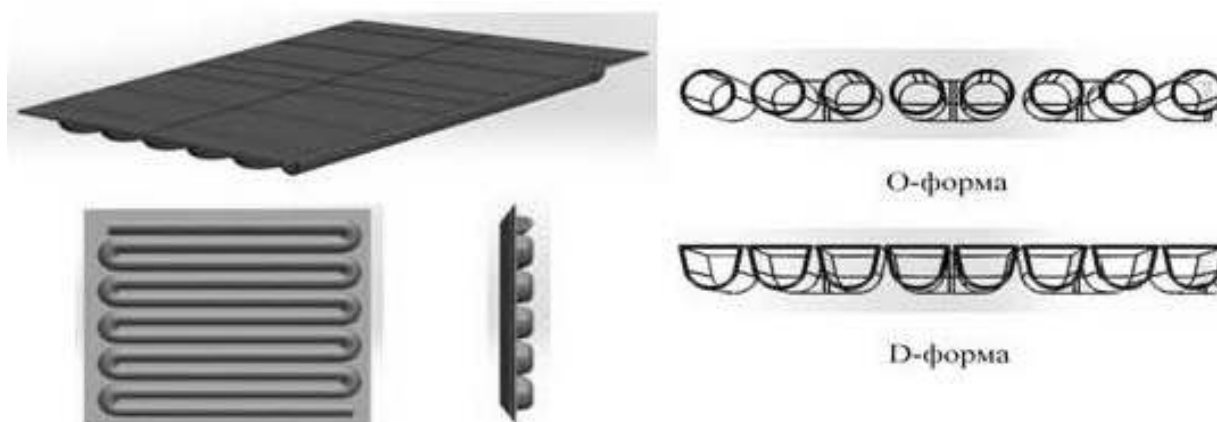
конструктивные характеристики системы охлаждения фотоэлементов.

Для решения поставленной задачи построена математическая модель фотоэлектрического модуля и проведено численное моделирование в программной среде SolidWorks.

Модель (рис. 1) состоит из четырех соединенных кремниевых монокристаллических фотоэлементов, под которыми установлен медный змеевик, с движущимся теплоносителем (вода) для снижения температуры солнечных элементов и получения дополнительного количества тепловой энергии.

Моделирование проводилось при следующих исходных данных: поступление солнечной радиации на поверхность модуля под прямым углом – 1000 Вт/м<sup>2</sup>, скорость ветра над и под фотоэлементами – 3,5 м/с и температура окружающего воздуха – 15,2 °С. Плоскость модуля установлена параллельно горизонту. Характеристики монокристаллического кремниевого ФЭП К6М [2]: мощность 4...4,5 Вт, полный квадрат, размер в 156 x 156 ± 0,5 мм,  $ff = 0,76$  и  $\eta = 18,46\%$  при стандартных условиях.

Результаты моделирования работы фотоэлементов без охлаждения их поверхности приведены в табл. 1.



**Рис. 1. Модель фотоэлектрического модуля в программной среде SolidWorks 2014.**

**Таблица 1. Результаты моделирования без охлаждения фотоэлементов**

| Температуры поверхности, °С |                  |                  | $ff$   | КПД    |
|-----------------------------|------------------|------------------|--------|--------|
| $t_{\text{CP}}$             | $t_{\text{MAX}}$ | $t_{\text{MIN}}$ |        |        |
| 84,7                        | 88,48            | 80,08            | 0,6335 | 0,1539 |

По результатам моделирования видно, что средняя температура на поверхности фотоэлемента составляет 84,7 °С, что приводит к значительному снижению коэффициента заполнения ВАХ фотоэлементов, и в последствии к снижению КПД на 3 %.

Для получения минимально возможной температуры на поверхности ФЭП, при которой его КПД будет иметь максимальное значение, было проведено компьютерное моделирование с целью определения оптимальных конструктивных параметров системы охлаждения ФЭП: диаметр трубок змеевика, форма трубок и расстояние (шаг) между ними.

Для охлаждения ФЭП использовалась вода с температурой на входе в трубку 20 °С и массовыми расходами  $G = \{0,0025, 0,01, 0,025, 0,1\}$  кг/с.

Внутренние диаметры трубок змеевика составляли  $d = \{10; 15, 20\}$  мм, а шаг равнялся внутреннему диаметру трубы. Были рассмотрены два вида форм трубок: О-формы и D-формы.

Результаты моделирования системы охлаждения поверхности ФЭП с трубками О-формы с различными диаметрами приведены в табл. 2.

На основании результатов можно сделать вывод, что наименьшая средняя температура и равномерность охлаждения поверхности фотоэлементов, которая характеризуется разницей между максимальной и минимальной температурой поверхности, наблюдается при внутреннем диаметре трубки змеевика 20 мм. Дальнейшее увеличение диаметра приводит к возрастанию расхода воды и энергетических затрат на ее циркуляцию.

Результаты моделирования системы охлаждения ФЭП с трубками змеевика D-формы при тех же условиях проведения эксперимента при эквивалентном диаметре трубок 20 мм приведены в табл. 3, а их сравнение с трубками змеевика О-формы на рис. 2, а. Из рисунка видно, что наименьшая средняя температура и равномерность охлаждения поверхности фотоэлементов прослеживается при D-форме трубки змеевика. Следовательно, в дальнейшем использовалась трубка D-формы, как более эффективный вариант.

Результаты моделирования при изменении расстояния между осями труб в интервале  $S = 20 \dots 40$  мм приведены в табл. 3 и на рис. 2, б.

Таблица 2. Результаты моделирования системы охлаждения поверхности ФЭП с трубками О-формы

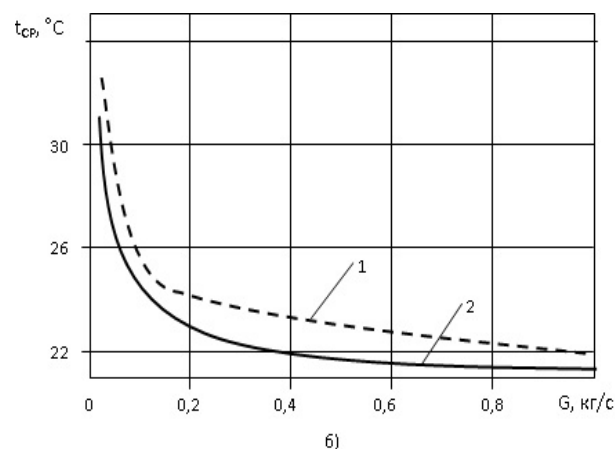
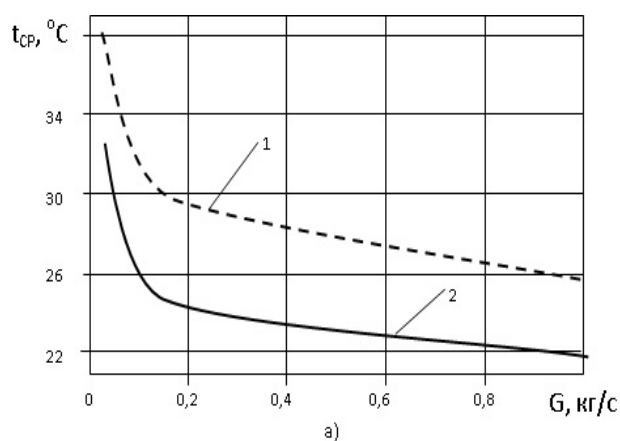
| Внутренний диаметр трубки, мм | Расход воды, кг/с | Температуры поверхности, °С |           |           |            | $ff$   | КПД    |
|-------------------------------|-------------------|-----------------------------|-----------|-----------|------------|--------|--------|
|                               |                   | $t_{CP}$                    | $t_{MAX}$ | $t_{MIN}$ | $\Delta t$ |        |        |
| 10                            | 0,0025            | 40,08                       | 63,28     | 25,36     | 37,92      | 0,7238 | 0,1758 |
|                               | 0,01              | 34,34                       | 52,64     | 23,03     | 29,61      | 0,7373 | 0,1791 |
|                               | 0,025             | 31,82                       | 49,08     | 22,13     | 26,95      | 0,7434 | 0,1806 |
|                               | 0,1               | 27,45                       | 43,52     | 20,83     | 22,69      | 0,7542 | 0,1832 |
| 15                            | 0,0025            | 38,11                       | 58,62     | 25,73     | 32,89      | 0,7284 | 0,1769 |
|                               | 0,01              | 32                          | 47,24     | 23,23     | 24,01      | 0,7430 | 0,1805 |
|                               | 0,025             | 29,77                       | 44,75     | 22,17     | 22,58      | 0,7484 | 0,1818 |
|                               | 0,1               | 25,85                       | 38,68     | 20,91     | 17,77      | 0,7583 | 0,1842 |
| 20                            | 0,0025            | 37,95                       | 56,46     | 25,44     | 31,02      | 0,7287 | 0,1770 |
|                               | 0,01              | 31                          | 44,7      | 23,19     | 21,51      | 0,7454 | 0,1810 |
|                               | 0,025             | 29,12                       | 41,7      | 22,28     | 19,42      | 0,7500 | 0,1822 |
|                               | 0,1               | 25,62                       | 38,57     | 21,29     | 17,28      | 0,7563 | 0,1837 |

Таблица 3. Результаты моделирования системы охлаждения ФЭП с трубками D-формы и различным шагом

| Внутренний диаметр трубки, мм | Расход воды, кг/с | Температуры поверхности, °C |                  |                  |            | $ff$   | КПД    |
|-------------------------------|-------------------|-----------------------------|------------------|------------------|------------|--------|--------|
| $d_{\text{вн}}$               | $G$               | $t_{\text{CP}}$             | $t_{\text{MAX}}$ | $t_{\text{MIN}}$ | $\Delta t$ |        |        |
| $S = 40$ мм                   |                   |                             |                  |                  |            |        |        |
| 20                            | 0,0025            | 32,55                       | 48,11            | 24,34            | 23,77      | 0,7416 | 0,1801 |
|                               | 0,01              | 25,64                       | 35,4             | 22,62            | 12,78      | 0,7588 | 0,1843 |
|                               | 0,025             | 23,89                       | 32,55            | 21,82            | 10,73      | 0,7633 | 0,1854 |
|                               | 0,1               | 21,97                       | 29,73            | 21,01            | 8,72       | 0,7682 | 0,1866 |
| $S = 26$ мм                   |                   |                             |                  |                  |            |        |        |
| 20                            | 0,0025            | 31,13                       | 45,76            | 23,62            | 22,14      | 0,7451 | 0,1810 |
|                               | 0,01              | 26,57                       | 37,65            | 22,61            | 15,04      | 0,7564 | 0,1837 |
|                               | 0,025             | 22,56                       | 30,54            | 21,32            | 9,22       | 0,7667 | 0,1862 |
|                               | 0,1               | 21,8                        | 29,3             | 21               | 8,3        | 0,7687 | 0,1867 |

Исходя из результатов моделирования установлено, что наименьшая средняя температура и равномерность охлаждения поверхности фотоэлементов отмечена при  $S = 26$  мм. Следовательно, при дальнейшем анализе конструк-

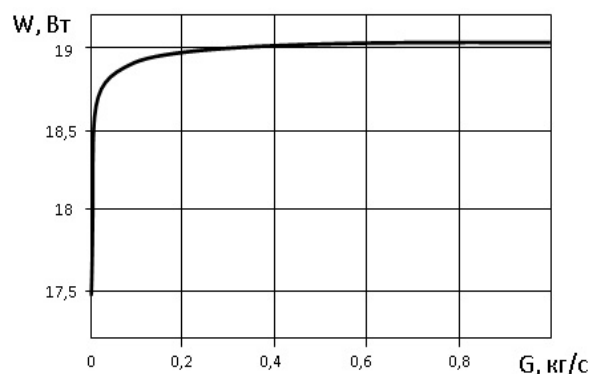
тивных характеристик охлаждения экспериментальной установки, использовали змеевик с расстоянием между осями трубок  $S = 26$  мм, как оптимальный вариант.



**Рис. 2. Зависимость средней температуры поверхности от расхода воды в змеевике:**  
 а) различные формы трубок: 1 – O-форма; 2 – D-форма;  
 б) различные шаги между осями труб: 1 –  $S = 40$  мм; 2 –  $S = 26$  мм.

На основе результатов моделирования построен график зависимости вырабатываемой

электрической мощности от расхода охлаждаемой воды (рис. 3).



**Рис. 3. Зависимость вырабатываемой электрической мощности от расхода воды.**

### Выводы

1. Выполнено численное моделирование работы ФЭП без охлаждения и с охлаждением его поверхности в программном обеспечении SolidWorks 2014.

2. Исследованы зависимости температуры на поверхности фотоэлементов от расхода воды, протекающей в змеевике.

3. Проанализированы результаты моделирования и выбраны оптимальные конструктивные характеристики для охлаждения фотоэлементов: трубки D-формы с эквивалентным диаметром

20 мм, шагом 26 мм и расходом воды около 0,2 кг/с.

4. Охлаждение ФЭП позволило увеличить его КПД на 3,3 % по сравнению с неохлаждаемым и производство электроэнергии с 17,5 Вт до 19 Вт.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Photovoltaic Education Network*: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pveducation.org>.

2. *KVAZAR* // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kvazar.com>.

### ANALYSIS OF EFFICIENCY PHOTOVOLTAIC SYSTEMS MUNICIPAL PURPOSE

**Karpenko D. S., Dubrovskaya V.V., Shklyar V.I.**

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute",  
Institute of Energy Saving and Energy Management,  
vul. Borshchagivska, 115, Kyiv, 03056, Ukraine.

A mathematical model of the solar module with a water cooling system of its surface was built. Numerical modeling with software SolidWorks and the

optimal structural characteristics (diameter and form tubes wheelbase coil tubes) of the cooling system were determined. The dependence of the generated electrical power from rate cooling water by the solar module was received.

References 2, tables 3, figures 3.

**Key words:** mathematical model of the solar module, the cooling system.

1. *Photovoltaic Education Network*: <http://pveducation.org>.

2. *KVAZAR*: <http://www.kvazar.com>.

Получено 08.02.2016

Received 08.02.2016

УДК 697.33:697.34

## РОЗВИТОК МЕТОДІВ АНАЛІЗУ Й УДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМІВ СИСТЕМ КОМУНАЛЬНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

Маліновський А.А., д-р техн. наук, Турковський В.Г., канд. техн. наук, Музичак А.З., канд. техн. наук  
Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Одним із інструментів аналізу й удосконалення режимів систем комунальної теплоенергетики є теорія гідравлічних кіл. Неповнота теорії не дозволяє охопити усі особливості сучасних систем теплопостачання. Запропоновано доповнити теорію гідравлічних кіл законом збереження імпульсів та увести в базову систему рівнянь усі складові рівняння Бернуллі.

Один из инструментов анализа и усовершенствования систем коммунальной теплоэнергетики это теория гидравлических цепей. Из-за неполноты теории невозможно охватить все особенности современных систем теплоснабжения. Предложено дополнить теорию гидравлических цепей законом сохранения импульсов и ввести в базовую систему уравнений все составляющие уравнения Бернулли.

One of the tools of analysis and improvement of municipal power regimes is the theory of hydraulic circuits. Incomplete theory can not cover all the features of modern heating systems. A supplement theory of hydraulic circuits law of conservation of momentum and introduce a basic system of equations all parts of the Bernoulli equation are proposed.

Бібл. 10, рис. 5.

**Ключові слова:** комунальна теплоенергетика, гідравлічне коло, теорія гідравлічних кіл, закон збереження імпульсу, злиття та розділення потоків, коефіцієнт впливу потоків суміжних віток.

$\alpha$  – коефіцієнт кінетичної енергії, що враховує похибку розрахунків за середньою швидкістю;

$\gamma$  – питомий об'єм середовища;

$\rho$  – густина середовища;

$\zeta$  – коефіцієнт гідравлічного опору;

$\phi$  – коефіцієнти впливу потоків суміжних віток;

$A_0, A$  – повна, розмірністю  $q \times m$ , та скорочена, розмірністю  $(q - v) \times m$ , перша матриця інцидентій;

$B$  – друга (розмірністю  $n \times m$ ) матриця інцидентій;  
 $m, q, n, v$  – кількість віток, вузлів, незалежних контурів у схемі та кількість гідравлічно незв'язаних частин кола;

$\vec{E}$  – вектор вимушувальних тисків віток гідравлічного кола;

$\vec{G}$  – вектор витрат середовища у вузлах;

$f$  – площа поперечного перерізу;

$h$  – втрати напору в вітці;

$H$  – діючий напір у вітці;

$p$  – тиск у центрі ваги перерізу потоку;

$\Delta \vec{p}$  – вектор втрат тиску у вітках гідравлічного

кола;

$\vec{P}_0$  – вектор тисків у вузлах гідравлічного кола;

$s$  – гідравлічний опір;

$S$  – діагональна матриця гідравлічних опорів віток гідравлічного кола;

$x$  – витрати транспортованого середовища у вітці;

$y$  – перепад тисків на вітці;

$\vec{x}, \vec{y}$  – вектори витрат транспортованого середовища та перепадів тиску у вітках;

$X$  – діагональна матриця, складена із модулів елементів вектора  $\vec{x}$ ;

$v$  – середня швидкість середовища (рідини) у перерізі;

$z$  – геометрична висота – висота центра ваги перерізу потоку;

**Нижні індекси:**

$i$  – показник стосується  $i$ -ої вітки гідравлічного кола;

$j$  – показник стосується  $j$ -го вузла гідравлічного кола;

О – базовий вузол гідравлічного кола;  
п, б, з – прямий, бічний та збірний рукави сполучного вузла у формі трійника відповідно;  
зп, зб – показник впливу потоку збірного рукава на потоки у прямому та бічному рукавах відповідно;

**Постановка проблеми.** Важливою передумовою ефективного функціонування систем комунальної теплоенергетики (систем теплопостачання та гарячого водопостачання) а також інших інженерних трубопровідних систем (систем холодного водопостачання і водовідведення) є розроблення та забезпечення оптимальних гідравлічних режимів.

Одним з ефективних інструментів аналізу режимів трубопровідних систем, що забезпечує мережний підхід до задачі, є теорія гідравлічних кіл (ТГК) [1]. Проте в ТГК основний акцент зроблено на схемно-структурній оптимізації, як наслідок багато проблем, пов'язаних з удосконаленням режимів, залишаються невирішеними. Зокрема не завжди можливе адекватне відтворення усіх складових інженерних трубопровідних систем (джерело, мережа, абонент) та їх аналіз як єдиного цілого.

**Аналіз останніх досліджень.** Теорія гідравлічних кіл базується на принциповій спільності явищ і забезпечує єдність математичних моделей і алгоритмів для розрахунку і оптимізації гідравлічних режимів як систем комунальної теплоенергетики так і інших інженерних трубопровідних систем різного типу. Для цього такі системи заміщають гідравлічним колом, для аналізу стану якого виділяють два підходи [1]: алгебричний та екстремальний. Понад півстолітньою практикою підтверджена ефективність першого підходу [2].

За алгебричного підходу гідравлічне коло описують системою рівнянь за першим та другим законами Кірхгофа, а також рівнянь віток [1, 3]. Рівняння стану кола в матрично-векторній формі має вигляд (додатним прийнято напрям потоку середовища від вузла):

$$\begin{cases} \mathbf{A}\vec{x} = -\vec{G}, \\ \mathbf{B}\vec{y} = 0, \\ \vec{y} = \vec{E} - \Delta\vec{p}_\tau. \end{cases} \quad (1)$$

В ТГК у рівняннях віток використовують век-

пз, бз – показник впливу потоків прямого та бічного рукавів на потік збірного рукава;  
т – тертя;  
шв – швидкісний;  
ін – інерційний.

тор діючих напорів  $\bar{H}$ , причому його розмірність подають в Па, хоч традиційно напір подають в м. Щоб уникнути такої неоднозначності введе- не поняття вимушувального тиску, а для його позначення використано літеру  $E$  (перша літера англійського слова enforcement). Вимушувальний тиск в Па та діючий напір в м пов'язані співвідношенням

$$E = \rho g H. \quad (2)$$

Систему рівнянь (1) називають контурною моделлю інженерної трубопровідної системи [1]. Також в ТГК використовують вузлову модель системи, яка має вигляд

$$\begin{cases} \mathbf{A}\vec{x} = -\vec{G}, \\ \vec{y} = \mathbf{A}_0^T \vec{p}_0, \\ \vec{y} = \vec{E} - \Delta\vec{p}_\tau. \end{cases} \quad (3)$$

Лінійні співвідношення в (1) і (3) доповнює  $m$  замикальних співвідношень – нелінійних залежностей між втратами тиску на тертя та витратами середовища у кожній вітці

$$\Delta p_{\tau,i} = s_i |x_i| x_i, \quad (4)$$

множина яких у матрично-векторній формі має вигляд

$$\Delta\vec{p}_\tau = \mathbf{S}\mathbf{X}\vec{x}. \quad (5)$$

Базові рівняння ТГК з часу її формування практично не зазнали змін [3]. На нашу думку саме неповнота цієї теорії ускладнює застосування її для аналізу та удосконалення режимів сучасних систем комунальної теплоенергетики та інших інженерних трубопровідних систем.

**Виділення невирішеної раніше частини загальної проблеми.** ТГК взяла свій початок з теорії електричних кіл (ТЕК). Базові постулати електротехніки адаптували для опису інженерних трубопровідних систем, тому основні фізичні закони протікання середовища у трубопровідних системах в ТГК присутні у тій формі, в якій вони сформувались в ТЕК:

- закон збереження маси – в ТГК він відомий

як закон нерозривності потоку, а математично як і в ТЕК записується у формі першого закону Кірхгофа;

- закон збереження енергії – стосовно інженерних систем існують дві форми врахування:

1) сума всіх сил, прикладених до тіла, у замкненій системі рівна нулю (і в ТЕК і в ТГК для контуру математично записується у формі другого закону Кірхгофа),

2) енергія не зникає, а лише переходить із однієї форми в іншу, чи стосовно ТГК механічна енергія під час руху середовища в трубопроводах перетворюється у теплову енергію (в ТЕК математично записується у формі вольт-амперної характеристики, а в ТГК – у формі замикального співвідношення);

- закон збереження імпульсу – не приймається до уваги ні в ТЕК, ні в ТГК.

У системах рівнянь контурної (1) чи вузлової (3) моделей відсутні рівняння, пов'язані із законом збереження імпульсу. У результаті нехтується фундаментальною властивістю середовищ (рідин) – інертністю.

**Формулювання мети роботи.** Більшість досліджень в рамках ТГК ведуть в напрямі синтезу оптимальної структури інженерної трубопровідної системи, де неврахування закону збереження імпульсу прийнятне, але створює суттєві перешкоди в задачах удосконалення режимів. Завданням дослідження є усунення

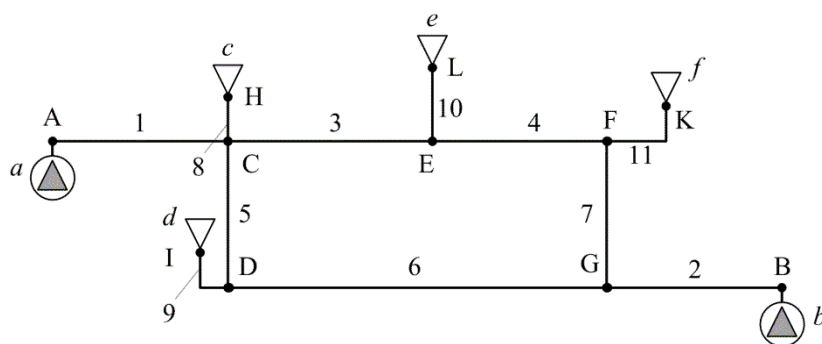
цього недоліку для інженерних трубопровідних систем, якими транспортується в'язке ньютонівське нестискуване середовище – систем водяного теплопостачання, гарячого і холодного водопостачання тощо. Саме такі системи складають основу комунального господарства населених пунктів України.

**Виклад основного матеріалу.** Для вирішення поставленого у статті завдання потрібно розглянути шлях формалізації задачі аналізу режиму інженерної системи від засад побудови гідравлічного кола, як заступної схеми інженерної системи, до розроблення адекватних моделей її основних елементів – віток та вузлів.

Розглянемо послідовно ці етапи.

**Етап 1 – засади побудови заступної схеми.** Розрізняють три основні типи елементів інженерних трубопровідних систем: активні джерела, лінії зв'язку (трубопроводи) і навантаження (абоненти). Залежно від представлення останніх отримуємо заступну схему (гідравлічне коло) різного рівня складності.

Як узагальнюючий приклад систем комунальної теплоенергетики та інших інженерних трубопровідних систем розглянемо систему теплопостачання з двома джерелами (*a*, *b*) та чотирма абонентами (*c*, *d*, *e*, *f*), схема якої наведена на рис. 1 (цифрами 1-11 позначено ділянки мережі системи теплопостачання, великими латинськими літерами А-К – вузли системи).



**Рис. 1. Схема системи теплопостачання з чотирма абонентами.**

В задачах синтезу оптимальної структури інженерної трубопровідної системи можна обмежитись однолінійною заступною схемою. Така схема для нашого прикладу наведена на рис. 2, де

вітки 1-11 відповідають ділянкам системи теплопостачання, а вітки 0, 12 – обладнанню джерел, основним елементом гідравлічних контурів яких є циркуляційна pompa.

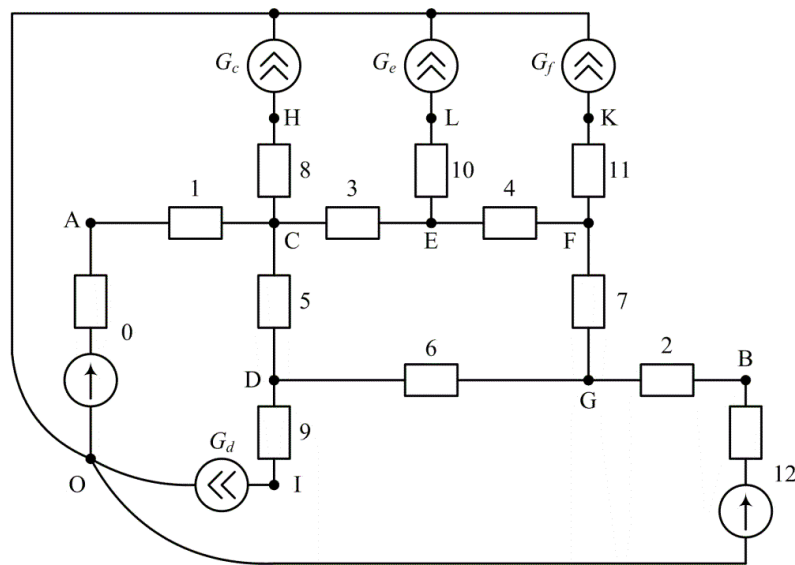


Рис. 2. Однолінійна заступна схема системи теплопостачання за рис. 1.

У такій заступній схемі абоненти задають як термінальні вузли з проектними витратами (з так званним фіксованим відбором, незалежним від змін тиску у вузлі). На заступній схемі їх відтворюють джерелами потоків із заданими витратами  $G_c$ ,  $G_d$ ,  $G_e$ ,  $G_f$  в (1) та (3) – це складові вектора  $\vec{G}$ . На схемі усі нижні кінці віток, що відповідають джерелам (циркуляційним помпам), сходяться у вузлі О, який у розрахунках приймають за базовий. У цьому ж вузлі сходяться джерела потоків абонентів.

Однолінійна заступна схема відтворює лише структуру системи теплопостачання, нею користуються для вирішення задач схемно-структурної оптимізації. Однак в схемі відсутня інформація про параметри абонентів, тому вона непридатна для вирішення задач аналізу та удосконалення робочих режимів.

Для режимних задач необхідно відтворити «кругообіг» середовища в системі теплопостачання та врахувати, що механічна енергія на відміну від електричної має дві форми – кінетичну та потенціальну. Це відображено в одному з основних рівнянь гідравліки – рівнянні Бернуллі [5]

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_t + h_{in}. \quad (6)$$

З фізичної точки зору інерційний напір  $h_{in}$

впливає на зміну енергії вздовж потоку та може виступати і як джерело додаткової енергії і як своєрідний опір [5].

Відповідно перепад тисків на пасивній вітці має складові геометричного тиску, швидкісного тиску, втрат тиску на тертя та зміни інерційного тиску

$$y = \rho g(z_1 - z_2) + \rho(\alpha_1 v_1^2 - \alpha_2 v_2^2)/2 - \Delta p_t - \Delta p_{in}. \quad (7)$$

Традиційний апарат ТГК з чотирьох складових правої частини цього рівняння враховує лише втрати тиску на тертя, що допустимо для однолінійних заступних схем. Однак під час відтворення кругообігу середовища в системі теплопостачання певну вагу відіграють й інші складові.

Якщо система теплопостачання розімкнена, однолінійну заступну схему замінюють розширеною зв'язною схемою (таку схему ще називають циклічною) [1]. Для цього в однолінійну заступну схему вводять додаткові умовні (фіктивні) вітки 13-16, що відповідають абонентам системи (рис. 3).

Фіктивні вітки виходять із вузлів, до яких приєднані абоненти, та сходяться в один вузол, зазвичай у нижній вузол вітки одного з джерел. Як і в попередньому випадку цей вузол (на рис. 3 вузол О) приймають за базовий.

Фіктивні вітки абонентів системи теплопостачання подають як активний двополюсник з

діючими напорами, спрямованими від базового вузла. Значення діючого напору  $H_i$  рівне різниці висот  $j$ -го вузла, в який входить  $i$ -та вітка та базового вузла [6]

$$H_i = z_j - z_0. \quad (8)$$

Значення втрати швидкісного тиску  $\Delta p_{\text{шв}}$  у фіктивній вітці залежить лише від швидкості по-

току у вхідному перерізі вітки [7], відповідно до (7) воно рівне

$$\Delta p_{\text{шв},i} = \frac{\alpha_i \rho v_i^2}{2} = \gamma \frac{\alpha_i}{2 f_i^2} x_i^2, \quad (9)$$

оскільки швидкість середовища за межами трубопроводної системи приймається нульовою.

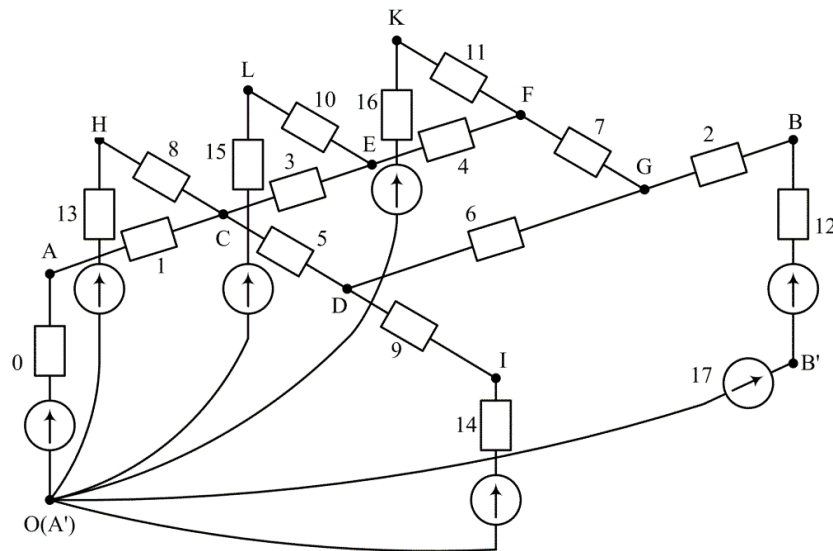


Рис. 3. Розширена зв'язна заступна схема системи теплопостачання за рис. 1.

В зв'язну заступну схему вводять також додаткові фіктивні вітки, що поєднують нижні вузли решти джерел живлення із базовим вузлом. Такі фіктивні вітки містять лише діючі напори, рівні різницям висот вузла джерела та базового вузла. На рис. 3 це вітка 17 для джерела 12.

Отримані значення напорів  $H_i$  входять у вектор діючих напорів  $\vec{E}$  систем рівнянь (1) чи (3) згідно з (2). Щодо втрат швидкісного тиску, то відповідно до рівняння Бернуллі (6), вони є доданком до втрат тиску на тертя. Подібним чином їх необхідно ввести і в рівняння віток, яке набуде вигляду

$$\vec{y} = \vec{E} - (\Delta \vec{p}_r + \Delta \vec{p}_{\text{шв}}). \quad (10)$$

Якщо система теплопостачання замкнена, однолінійну заступну схему замінюють дволінійною заступною схемою, яка наведена на рис. 4. На рисунку вітки 0, 12 відповідають джерелам, вітки 1-11 – подавальним, а 1'-11' – зворотним трубопроводам ділянок трубо-

проводної системи, вітки 13-16 – обладнанню абонентів.

Якщо із системи теплопостачання є частковий відбір середовища (теплоносія) чи необхідно врахувати його витoki, тоді в заступну схему вводять вітки, що відповідають живильним помпам, а відбір середовища подають через джерела потоків чи фіктивними (умовними) вітками.

Таким чином, у випадку відтворення кругообігу середовища в системі теплопостачання, необхідно враховувати усі складові рівняння Бернуллі, а отже необхідне введення їх у системи рівнянь (1) та (3). Це у свою чергу вимагає адекватної математичної моделі вітки гідравлічного кола.

**Етап 2 – удосконалення математичної моделі вітки.** Під час розроблення математичної моделі необхідно розглядати вітки двох типів – реальну, ту, яка відповідає конкретному елементу системи теплопостачання, та умовну (фік-

тивну) вітку, яка відтворює відбір середовища з системи.

Для реальної вітки враховується лише одна складова рівняння Бернуллі – втрати тиску на тертя, які визначають за формулою Дарсі-Вайсбаха. Проте така формула неуніверсальна, оскільки коефіцієнт гідравлічного тертя для кожного виду труб визначають за своєю залежністю. Тому часто користуються наближеною апроксимаційною функцією, зокрема в ТГК прийнята квадратична апроксимаційна залежність (4). Квадратична залежність добре відтворює замикальні характеристики сталених трубопроводів, проте не забезпечує належної

точності для трубопроводів з нових матеріалів як пластмаса, полімери тощо [8].

Сучасний рівень розвитку засобів перетворення інформації дозволяє у розрахунках використовувати не лише одночленні, а й багаточленні залежності. Степені залежності доцільно брати цілими, оскільки перший та другий степені уже присутні в рівняннях (1) чи (3) та (9).

Обґрунтовано, що оптимальною апроксимаційною залежністю є кубічний поліном з продовженням характеристики у третій квадрант [8].

$$\Delta p_r = \gamma (s_1 |x| + s_2 |x|^2 + s_3 |x|^3) \operatorname{sgn}(x). \quad (11)$$

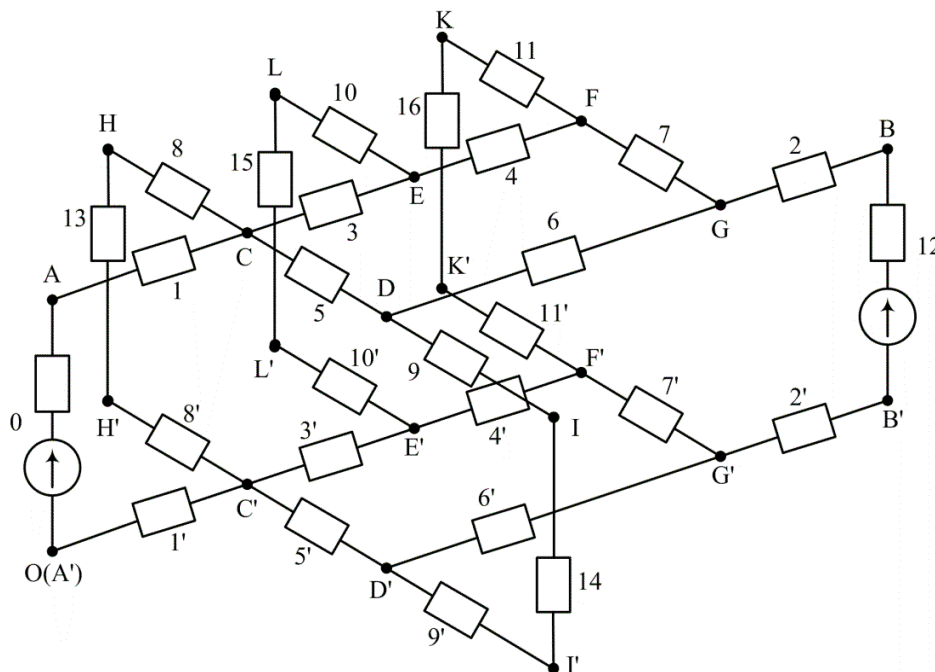


Рис. 4. Дволінійна заступна схема системи теплопостачання за рис. 1.

Точність відтворення оцінювалась коефіцієнтом варіації та максимальною відносною похибкою. Для труб різного матеріалу та різного діаметру в діапазоні зміни швидкості середовища від 0,2 м/с до 3 м/с коефіцієнт варіації не перевищує 1,2 %, а відносна максимальна похибка – 3,5 %.

Апроксимаційна функція (11) також адекватно відтворює гідравлічні характеристики pomp як вітчизняного так і закордонного виробництва [8].

Щодо фіктивних віток, то втрати швидкісного тиску (9) також охоплюються цим поліномом, тому замикальне співвідношення включає обидві складові

$$(\Delta p_r + \Delta p_{\text{шв}}) = \gamma (s_1 |x| + s_2 |x|^2 + s_3 |x|^3) \operatorname{sgn}(x). \quad (13)$$

Щоб записати отримані системи рівнянь компактно у матрично-векторній формі в [1] було прийняте двояке представлення компонентів витрат у вигляді вектора-стовпця  $\vec{x}$  і діагональної матриці  $\mathbf{X}$  (4), що на той час було незвично, зокрема й з точки зору ТЕК.

З розвитком комп'ютерної техніки та математичних програмних пакетів поширення набули поелементні операції над векторами та матрицями, зокрема у системі математичного програмування Matlab такі операції носять назву операцій над масивами. Для таких операцій передбачені спеціальні оператори: в Matlab перед операцією ставиться крапка.

У цьому разі замикальне співвідношення (12) для віток гідравлічного кола у матрично-векторній формі набуде вигляду

$$(\Delta \vec{p}_\tau + \Delta \vec{p}_{\text{шв}}) = \gamma (S_1 |\vec{x}| + S_2 |\vec{x}|^2 + S_3 |\vec{x}|^3) \cdot \text{sgn}(\vec{x}), \quad (13)$$

де  $|\vec{x}|^2$ ,  $|\vec{x}|^3$  – поелементне піднесення до квадрату та кубу компонентів вектора  $\vec{x}$  відповідно,  $\cdot \text{sgn}(\vec{x})$  – поелементне перемноження вектора  $(S_1 |\vec{x}| + S_2 |\vec{x}|^2 + S_3 |\vec{x}|^3)$  та вектора  $(\vec{x})$ .

Таким чином у замикальному співвідношенні (13) враховано зв'язок між втратами тиску на тертя і швидкісного тиску та параметрами

елементів системи. Роль ще однієї складової рівняння Бернуллі – зміни інерційного тиску проявляється в елементах трубопровідної системи, в яких відбувається злиття чи розділення потоків, тобто у вузлах гідравлічного кола.

**Етап 3 – розроблення математичної моделі вузла.** На відміну від електричних кіл, де вузли не мають опору, сполучні елементи гідравлічних кіл чинять опір протіканню середовища, а отже необхідні їх математичні моделі.

В усіх сполучних елементах наявний процес злиття чи розділення потоків окремих рукавів, а тому тут необхідно розглядати одночасно два процеси: процес деформації середовища та процес вирівнювання швидкостей під час змішування потоків у збірному рукаві.

Злиття потоків у сполучному елементі зумовлює нестационарні процеси в окремих елементах системи навіть за усталеного режиму її роботи, що веде до зміни інерційного тиску вздовж потоку.

Розглянемо сполучний вузол гідравлічного

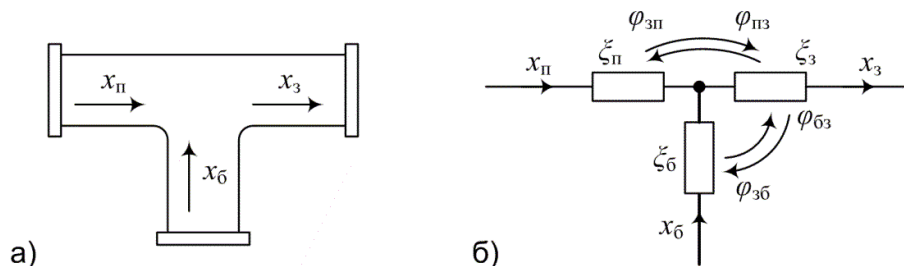


Рис. 5. Сполучний вузол трьох віток гідравлічного кола.

а) схематичне зображення у витяжному режимі; б) заступна схема вузла.

кола, у якому сходиться три вітки (рис. 5,а).

Зазвичай втрати тиску у трійнику визначають через сталий коефіцієнт місцевого опору, хоч насправді він залежить від співвідношення витрат середовища у рукавах трійника [7], основною причиною чого є зміна інерційного тиску. І якщо, нехтування зміною інерційного тиску у трійниках чи хрестовинах зумовлює лише похибку в розрахунках (до 25 % в розрахунку внутрішньобудинкових мереж [9]), то математичні моделі таких елементів як елеваторний вузол чи триходовий клапан без цієї складової будуть зовсім неадекватними.

У рівнянні Бернуллі (6) зміна інерційного тиску є доданком до втрат тиску на тертя, тому його слід вносити як ще один доданок у рівняння віток (10), яке набуде вигляду

$$\vec{y} = \vec{E} - (\Delta \vec{p}_\tau + \Delta \vec{p}_{\text{шв}} + \Delta \vec{p}_{\text{ин}}). \quad (14)$$

Для сполучних елементів значення зміни інерційного тиску одержане з рівняння імпульсів, при цьому введено нове поняття – коефіцієнт впливу суміжних віток, за допомогою якого описано вплив потоків один на одного [8, 10]. Ці коефіцієнти введені в матрицю  $S_2$  коефіцієнтів апроксимуючої функції (12) як позадіаго-

нальні елементи. Для вузла, заступна схема якого наведено на рис. 5,б, така матриця має вигляд

$$S_2 = \begin{bmatrix} \frac{\xi_{п}}{2f_{п}^2} & 0 & \frac{\varphi_{зп}}{f_{п}f_3} \\ 0 & \frac{\xi_6}{2f_6^2} & \frac{\varphi_{з6}}{f_6f_3} \\ \frac{\varphi_{пз}}{f_{п}f_3} & \frac{\varphi_{з6}}{f_6f_3} & \frac{\xi_3}{f_3^2} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Наведена математична модель адекватно відтворює гідравлічні характеристики широкого спектру елементів [8], розглянутий звичайний трійник є лише наочним прикладом. Методика визначення коефіцієнтів (15), та їх значення для трійників різного виконання наведено в [10].

### Завершена система рівнянь

Згідно з розробленими математичними моделями вітки і вузла рівняння віток окрім втрат тиску на тертя за традиційним апаратом ТГК, повинне містити зміну швидкісного та інерційного

тисків. З врахуванням цього контурна математична модель інженерної трубопровідної системи (1) набуде вигляду

$$\begin{cases} \mathbf{A}\vec{x} = -\vec{G}, \\ \mathbf{B}\vec{y} = 0, \\ \vec{y} = \vec{E} - (\Delta\vec{p}_T + \Delta\vec{p}_{шв} + \Delta\vec{p}_{ін}), \end{cases} \quad (16)$$

а вузлова модель (3) – вигляду

$$\begin{cases} \mathbf{A}\vec{x} = -\vec{G}, \\ \vec{y} = \mathbf{A}_0^T \vec{P}_0, \\ \vec{y} = \vec{E} - (\Delta\vec{p}_T + \Delta\vec{p}_{шв} + \Delta\vec{p}_{ін}). \end{cases} \quad (17)$$

Ці системи рівнянь доповнені замикальним співвідношенням, яке з врахуванням зміни інерційної складової тиску має вигляд

$$(\Delta\vec{p}_T + \Delta\vec{p}_{шв} + \Delta\vec{p}_{ін}) = \gamma (S_1 |\vec{x}| + S_2 |\vec{x}|^2 + S_3 |\vec{x}|^3) \cdot \text{sgn}(\vec{x}). \quad (18)$$

Врахування усіх складових зміни тиску у кубічному поліномі наочно показано на рис. 6.

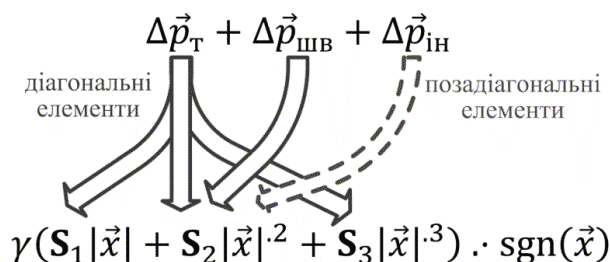


Рис. 6. Механізм відтворення складових рівняння Бернуллі.

Запропоновані зміни у вихідних рівняннях теорії гідравлічних кіл дозволяють адекватно відтворити гідравлічні характеристики широкого спектру елементів сучасних систем комунальної теплоенергетики та інших інженерних трубопровідних систем. Отримана модель дозволяє виконувати аналіз усіх складових системи (джерело, мережа, абонент) як єдиного цілого та ефективно застосовувати методи теорії гідравлічних кіл для аналізу та удосконалення їх гідравлічних режимів. У системах комунальної теплоенергетики раціональний гідравлічний режим окрім заощадження енергоресурсів є також передумовою забезпечення необхідного теплового режиму.

Ефективність застосування розробленої

моделі підтверджена на прикладі аналізу та оптимізації характерної ділянки системи теплопостачання, наведеного в [8].

### Висновки

1. Адекватне відтворення гідравлічних режимів систем комунальної теплоенергетики та інших інженерних трубопровідних систем можливе лише за системного підходу до формування мережної математичної моделі з врахуванням в рівняннях стану обох форм механічної енергії та впливу інертності теплоносія.
2. Нове поняття – коефіцієнт впливу суміжних віток дозволяє врахувати закон збереження імпульсу і змодельовати в рамках теорії гідравлічних кіл елементи, у яких відбувається

злиття чи розділення потоків.

3. Форма замыкального співвідношення, яка враховує усі складові рівняння Бернуллі (втрати тиску на тертя, зміну швидкісного тиску та зміну інерційного тиску) дозволяє адекватно відтворити гідравлічні характеристики елементів інженерних трубопровідних систем та ефективно застосовувати методи теорії гідравлічних кіл для аналізу та удосконалення їх режимів.

4. Наведені у статті заступні схеми та математичні моделі справедливі для інженерних трубопровідних систем, у яких середовищем є ньютонівська нестискувана рідина, – систем водяного теплопостачання, гарячого і холодного водопостачання тощо. Поширення наведених даних на парові системи теплопостачання чи системи газопостачання вимагають подальших досліджень.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Меренков А.П.* Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
2. *Сеннова Е.В.* Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем / Е.В. Сеннова, В.Г. Сидлер. – Новосибирск: Наука, 1987. – 219 с.
3. *Новицкий Н.Н.* Гидравлические цепи. Развитие теории и приложения / Н.Н. Новицкий, Е.В. Сеннова, М.Г. Сухарев и др. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, – 2000. – 273 с.
4. *Меренков А.П.* Обобщение электротехнических методов на гидравлические цепи / А.П. Меренков, В.Г. Сидлер, М.К. Такайшвили. – Электронное моделирование. – 1982. – №2. – С. 3-11.
5. *Френкель Н.З.* Гидравлика. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 456 с., ил.
6. *Абрамов Н.Н.* Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. – М.: Стройиздат, 1972. – 288 с.
7. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям // Под ред. Штейнберга М.О. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.: ил.
8. *Музичак А.З.* Математичні моделі й алгоритми аналізу та удосконалення режимів систем централізованого теплопостачання: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.14.01 / Музичак Андрій Зіновійович – Київ, 2014 – 20 [1] с.
9. *Malinowski A.* Analiza stanów hydraulicznych celem optymalizacji pracy systemów ogrzewania budynków mieszkalnych / A. Malinowski, W. Turkowski, A. Muzyczak // Czasopismo techniczne politechniki Krakowskiej. – 2010. – 2-B. – P.107-115.
10. *Маліновський А.А.* Математична модель трійника з коефіцієнтами взаємного впливу рукавів / А.А. Маліновський, В.Г. Турковський, А.З. Музичак // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Теплоенергетика, Інженерія довкілля. Автоматизація – 2010. – №677 – С.27-32.

# DEVELOPMENT METHODS OF ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF REGIMES OF MUNICIPAL HEATING SYSTEMS

**Malinovskyi A.A., Turkovskyi V.H., Muzychak A.Z.**

Lviv Polytechnic National University,  
str. Stepan Bandera 12, Lviv, 79013, Ukraine

One of the modern tools of analysis and improvement of municipal power regimes is the theory of hydraulic circuits. This theory was formed on the basis of the theory of electrical circuits in the 60 s of last century. It is well suited for structural optimization municipal power but was effective for optimization of regimes. A supplement theory of hydraulic circuits law of conservation of momentum and introduce a basic system of equations all parts of the Bernoulli equation are proposed. In this paper the mathematical model of the modern heating systems it takes into account amendments referred to in the equivalent circuit models of system and its elements.

References 10, figures 5.

**Key words:** municipal power system, hydraulic circuit, theory of hydraulic circuits, law of conservation of momentum, merge and separation flows, impact factor related branches.

1. *Merenkov A.P.* Theory of hydraulic circuits / A.P. Merenkov, V.Ja. Hasilev – Moscow: Nauka, 1985. – 278 p. (Rus.)
2. *Sennova E.V.* Mathematical modeling and optimization of heat supply systems / E.V. Sennova, V.G. Sidler – Novosibirsk: Nauka, 1987. – 219 p. (Rus.)

3. *Novickij N.N.* Hydraulic circuits: Development of the theory and applications / N.N. Novickij, E.V. Sen-nova, M.G. Suharev – Novosibirsk: Nauka, – 2000. – 273 p. (Rus.)
4. *Merenkov A.P.* Generalization of electrical methods for hydraulic circuits / A.P. Merenkov, V.G. Sidler, M.K. Takajshvili. – Electronic simulation. – 1982. – Vol. 2. – P. 3-11 (Rus.)
5. *Frenkel N.Z.* Hydraulics. – M.-L.: Gosjenergizdat, 1956. – 456 c., ill. (Rus)
6. *Abramov N.N.* Theory and methods of calculation systems water supply and distribution. – Moscow: Stroiyzdat, 1972. – 288 p. (Rus.)
7. *Idel'chik I.E.* Handbook of hydraulic resistance. // By red. Shteinberh M.O. – 3-rd edition. – Moscow: Mashynostroenye, 1992. – 672 p. (Rus.)
8. *Muzychak A.Z.* Mathematical models and algorithms of analysis and improvement of regimes of centralized heat supply systems: abstract. diss. candidate of technical science: 05.14.01 / Muzychak Andrii Zinoviiiovych – Kyiv, 2014 – 20 [1] c. (Ukr.)
9. *Malinowski A.* The analysis of hydraulic regimes for the purpose of optimization of work of heating systems of apartment buildings / A. Malinowski, V. Turkowski, A. Muzychak // Technical transactions Politechnika Krakowska. – 2010. – 2-B. – P.107-115. (Pol.)
10. *Malinowski A.A.* Mathematical model tee with coefficients of mutual influence sleeves / A.A. Malinowski, V.G. Turkowski, A.Z. Muzychak // Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika» Teploenerhetyka, Inzheneriia doovkillia. Avtomatyzatsiia – 2010. – №677 – P.27-32. (Ukr.)

Получено 20.07.2015

Received 20.07.2015