TERMODYNAMICZNE ASPEKTY PROCESÓW TRANSPORTU MASY, PĘDU I ENERGII

Książka abstraktów

POD REDAKCJĄ
Dariusza Butrymowicza, Romualda Mosdorfa i Pawła Jakończuka

Politechnika Białostocka

PAN
POLSKA AKADEMIA NAUK

Komitet Termodynamiki i Spalania

XXVI Zjazd Termodynamików

Augustów, 8-11 września 2026

TERMODYNAMICZNE ASPEKTY PROCESÓW TRANSPORTU MASY, PĘDU I ENERGII

XXVI ZJAZD TERMODYNAMIKÓW

KSIĄŻKA ABSTRAKTÓW

pod redakcją

Dariusza Butrymowicza, Romualda Mosdorfa, Pawła Jakończuka

Politechnika Białostocka

PAN POLSKA AKADEMIA NAUK

Komitet Termodynamiki i Spalania

BIAŁYSTOK 2026

Sponsorzy

Partner strategiczny

Podlaskie

PATRONAT REKTOR
POLITECHNIKI
BIAŁOSTOCKIEJ

Skład:
Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej

Okładka:
Marcin Dominów

Zdjęcie na okładce:
https://pixabay.com/pl/photos/kanion-piaskowiec-ska%C5%82y-geologia-9215914/

ISBN 978-83-68673-42-5
ISBN 978-83-68673-43-2 (eBook)
DOI: 10.65731/978-83-68673-43-2

Druk: Agencja Reklamowa TOP Agnieszka Łucza

Spis treści

Komitet Naukowy 13
Komitet Programowy 14
Komitet Organizacyjny 14
Słowo wstępne 15
Historia Zjazdów Termodynamików 17
Rozdział 1. Procesy transportu i spalania 19
Wybrane aspekty niestabilności procesu skraplania zamienników *F-gazów* w minikanałach
WALDEMAR KUCZYŃSKI 20
Nieinwazyjne wyznaczanie sztywności ścian tętnicy szyjnej
WOJCIECH ADAMCZYK, JAN JUSZCZYK, MAREK ROJCZYK,
ZIEMOWIT OSTROWSKI, MATEUSZ MESEK, RYSZARD BIAŁECKI 22
Fotoelektrycznie zintegrowane technologie energetyczne nowej generacji:
Sprawności energetyczne reaktorów
JANUSZ KOTOWICZ, MATEUSZ BRZĘCZEK, DOMINIK HULAK 23
Teoria eksperymentu w procesach wymiany ciepła
JAROSŁAW MIKIELEWICZ, DARIUSZ MIKIELEWICZ 25
Monitoring of Thermal Stresses in Thick-Walled Boiler Components
Using Inverse Heat Conduction Modelling
JAN TALER, PIOTR DZIERWA, DAWID TALER, KAROL KACZMARSKI
MARCIN TROJAN, SŁAWOMIR GRĄDZIEL 26
Measurement of unsteady fluid temperature
using flat, cylindrical, and spherical thermometers
JAN TALER, TOMASZ SOBOTA, DAWID TALER, MAGDALENA JAREMKIEWICZ 28
Analiza wyników badań dyfuzyjności cieplnej metodą LFA z zastosowaniem
różnych modeli wymiany ciepła
RAFAŁ GAŁEK, JOANNA WILK....30
Zachowanie się płomienia wodorowego w warunkach wysokich ciśnień
w atmosferze wzbogaconej w dwutlenek węgla
HALINA PAWLAK-KRUCZEK, PIOTR BOJARSKI,
MICHAL CZEREP, JAKUB MULARSKI, MATEUSZ KOWAL
DARIUSZ PYKA, SYLWIA OLES, ARTUR POZARLIK 32
Analiza wpływu wielkości obszaru kompozytu pianka metaliczna–materiał zmiennofazowy
na efektywny współczynnik przejmowania ciepła
MIROSŁAW SEREDYŃSKI, WOJCIECH PIÓRKOWSKI
JERZY BANASZEK, MACIEJ JAWORSKI 34
Thermodynamic modeling and analysis of supercritical coal-fired power plant operation
integrated with carbon dioxide capture process
PAWEŁ MADEJSKI, NAVANEETHAN SUBRAMANIAN....35

Rozdział 2. Procesy chłodzenia, układy chłodnicze i pompy ciepła 37

Dynamiczne modelowanie procesu adsorpcji w układzie chłodniczym z uwzględnieniem geometrii poprzez sprzężenie z CFD
SZYMON JANUSZ, MARCIN BORCUCH, PIOTR CYKLIS 38

Developing Large Air-Source Heat Pumps for District Heating: Design Challenges, System Integration, and Research Needs
JACEK KALINA.....40

Historia rozwoju technologii pomp ciepła na świecie
MAŁGORZATA SIKORA 42

Energetic and Exergetic Assessment of a Hybrid System Operating Under Real Conditions
ANNA MATYJA, WALDEMAR KUCZYŃSKI.....43

Eksperymentalna analiza współpracy płaskich i próżniowych kolektorów słonecznych z adsorpcyjnym agregatem chłodniczym
MARCIN BORCUCH, DAWID POLEĆ, SZYMON JANUSZ 44

Rozdział 3. Wymienniki ciepła 47

Identification of Nusselt Number Correlations for a Counterflow Helical Tube-in-Tube Heat Exchanger
JAN TALER, EWELINA ZIÓŁKOWSKA, DAWID TALER, TOMASZ SOBOTA 48

Optimization of the high-temperature heat exchanger design of a gas turbine system
DARIUSZ KARDAŚ, SYLWIA POLESEK-KARCZEWSKA
IZABELA WARDACH-ŚWIĘCICKA 49

Sterowana nierównomierność rozpływu czynnika jako narzędzie minimalizacji generacji entropii w krzyżowoprądowym wymienniku ciepła
TOMASZ BURY, MAŁGORZATA HANUSZKIEWICZ-DRAPAŁA.....50

Bidyspersyjne struktury porowate – badania eksperymentalne nad konwekcją Rayleigha-Bénarda
PAWEŁ DĄBROWSKI, MARK TUMMERS, KAMEL HOOMAN 52

Rozdział 4. Procesy przemian fazowych i rurki ciepła 55

Dimensionless Analysis of Pool Boiling on a Tube Bundle at Low Pressure
DOMINIKA KACZMAREK-PIĄSTKA, TOMASZ HAŁON,
BARTOSZ ZAJĄCZKOWSKI 56

Intensyfikacja wrzenia pęcherzykowego przy zastosowaniu nanocząstek SiO_2
KAROLINA BĘBACZ, ROBERT KANIOWSKI, SYLWIA WCIŚLIK 58

Experimental Study of Stainless-Steel Porous Wicks for a Water-Charged Flat Loop Heat Pipe Evaporator Operating at Moderate Temperatures
PAWEŁ SZYMAŃSK, DARIUSZ MIKIELEWICZ 59

Experimental investigation of condensation heat transfer in an additively manufactured minichannel heat exchanger
KATARZYNA CHLISZCZ, WALDEMAR KUCZYŃSKI.....61

Symulacje i badania eksperymentalne ekspanderów zasilanych parą mokrą
WIESŁAW ZIMA, ARTUR CEBULA, KAROL MORAŃSKI.....62

Rozdział 5. Zagadnienia implementacji technologii materiałowych oraz technologii addytywnych w procesach cieplnych....65

Wydajność termohydrauliczna wymienników ciepła TPMS wytwarzanych metodą addytywną: ocena eksperymentalna i skalowanie oparte na PEC
MARCIN KRUZEL, TADEUSZ BOHDAL
KRZYSZTOF DUTKOWSKI, JAN BORATYŃSKI 66

Badanie wpływu modelu gęstości złoża proszku na końcowy kształt spoiny druku 3D
MIROSŁAW SEREDYŃSKI, TOMASZ ZATORSKI
DARIUSZ MISZCZYK, JERZY BANASZEK....67

Modelowanie numeryczne wymiany ciepła w epoksydowym kompozycie dyspersyjnym z wypełnieniem w postaci anizotropowych inkluzji węglowych
MACIEJ KOWALSKI, ŁUKASZ OMEN, ANDRZEJ J. PANAS 69

Wpływ struktury typu potrójnie periodyczna powierzchnia minimalna (TPMS) na krytyczną liczbę Reynoldsa w przepływie przez drukowany ze stali 316L wymiennik ciepła
KRZYSZTOF DUTKOWSKI, MARCIN KRUZEL, TADEUSZ BOHDAL,
MARIAN TRAFCZYŃSKI, KRZYSZTOF WOŁOSZ, SŁAWOMIR ALABRUDZIŃSKI 71

The effect of directionality of macroscopic structure of contacting surfaces on thermal contact conductance of metallic joints
TOMASZ S. WIŚNIEWSKI....72

Rozdział 6. Wpływ zewnętrznych pól elektrycznych, magnetycznych i złożonych geometrii na procesy cieplno-przepływowe 73

A statistical approach to EWOD analysis based on Recurrence Probability Analysis and *k-NN* Entropy
GABRIELA RAFAŁKO, NORBERT MARWAN
ROMUALD MOSDORF, PIOTR MROZEK 74

Wymiana ciepła w sekcji konwekcyjnej reaktora fluidalnego
ARTUR BŁASZCZUK, SZYMON JAGODZIK 76

Mixed convection of paramagnetic fluid modified by a thermomagnetic force distribution with two extrema: a numerical study
LUKASZ PLESKACZ, ELZBIETA FORNALIK-WAJS....78

Cieplno-przepływowe badania eksperymentalne mini strug syntetycznych
PAWEŁ GIL, RAFAŁ GAŁEK....80

Rozdział 7. Zagadnienia zrównoważonej gospodarki energetycznej 83

Możliwości współdziałania elektrowni jądrowych z pogodozależnymi źródłami OZE, historia i perspektywy
KRZYSZTOF BADYDA....84

Kierunki rozwoju energetycznego świata na tle zasobów energetycznych i rozwoju technologii konwersji energii
ROMAN DOMAŃSKI....86

Innowacyjne wykorzystanie odpadów rybnych do produkcji biomasy mikroalgowej przeznaczonej na substrat biogazowy
MAŁGORZATA SMUGA-KOGUT, TOMASZ PISKIER, DARIA SZYMANOWSKA, MAŁGORZATA HAWROT-PAW, MARCIN KRUZEL, KRZYSZTOF DUTKOWSKI 89

Ujemna emisja CO_2 poprzez wytwarzanie biowęgla
RAFAŁ KOBYŁECKI, ROBERT ZARZYCKI 91

Experimental and numerical investigation of hydrogen combustion in oxygen-steam mixtures
ADAM KLIMANEK, SŁAWOMIR SŁADEK, JAKUB TUMIDAJSKI AGNIESZKA CIESIELSKA, MICHAŁ CHABIŃSKI, ANDRZEJ SZLĘK.....92

Industrial Utilization of Low-Temperature Waste Heat: Practical Implementations of ORC Systems and Ejector Refrigeration Cycles Using R1233zd(E)
MIKOŁAJ MASTROWSKI, PIOTR KLONOWICZ, ŁUKASZ ANTCZAK 94

Rozdział 8. Badania eksperymentalne i diagnostyka procesów cieplno-przepływowych 95

Badania eksperymentalne ustalonego stanu pracy dla silnika satelitarnego typu resistojet
JAN KINDRACKI, KAROL SZCZEGÓLSKI.....96

Badania eksperymentalne wpływu temperatury początkowej na liniową prędkość spalania ziarna, rakietowego materiału pędnego opartego na lepiszczu – poli(azydku glicydylu)
JAN KINDRACKI, KRZYSZTOF WACKO, MICHAŁ CHMIELAREK SYLWIA METELSKA, ŁUKASZ MĘŻYK, PRZEMYSŁAW WOZNIAK MACIEJ KOŁODZIEJ, TOMASZ GOŁOFIT KATARZYNA CIEŚLAK, PAWEŁ MAKSIMOWSKI 98

Thermodynamic analysis of frictional heat generation in multi-vane machinery
SZYMON LECH, PIOTR KOLASIŃSKI, DAWID SOWA 100

Metoda obliczeniowa i jej eksperymentalna weryfikacja – Wychwyt CO_2 przez adsorpcję zmiennotemperaturową przy ruchomym złożu
ADAM PAWŁOWSKI, ARTUR CEBULA..... 101

Analiza termodynamiczna i wstępne pomiary silnika spalinowego sześciosuwowego
IRENEUSZ SZCZYGIEŁ, GRZEGORZ PRZYBYŁA 103

Rozdział 9. Wymiana ciepła i masy – wrzenie, kondensacja, przepływy dwufazowe i minikanały..... 105

Problem „dry spot" przy odparowaniu koncentratu soku na rurach pionowych
ADAM SOBIK, PIOTR CYKLIS 106

Przejmowanie ciepła w quasi-idealnym płaszczowo-rurowym wymienniku ciepła z przegrodami segmentowymi
JANUSZ T. CIEŚLIŃSKI, PAWEŁ DĄBROWSKI KAMIL STASIAK, KRZYSZTOF TESCH..... 108

Badania eksperymentalne wydajności cieplnej i hydrodynamicznej wymiennika ciepła z minikanałami
MARIA TYCHANICZ-KWIECIEŃ, JOANNA WILK 110

Nowa generacja płynów dielektrycznych – badania eksperymentalne nad zamiennikiem HFE-7100
PAWEŁ DĄBROWSKI, MAJA KASZUBA, REHAN KHAN RITUNESH KUMAR, DARIUSZ MIKIELEWICZ 111

Wpływ położenia źródła ciepła na konwekcję swobodną w zamkniętej przestrzeni wypełnionej cieczą dielektryczną
MIKOŁAJ KOŁTONOWSKI, MAŁGORZATA SIKORA, TADEUSZ BOHDAL 113

Wyznaczanie współczynnika przejmowania ciepła w kompozycie pianka metalowa – materiał zmiennofazowy na podstawie geometrii uproszczonej
WOJCIECH PIÓRKOWSKI, JERZY BANASZEK
MACIEJ JAWORSKI, MIROSŁAW SEREDYŃSKI 114

Koncepcja systemu pomiarowego do analizy obrazów przepływów dwufazowych w minikanałach
MATEUSZ CEDZYŃSKI, MAGDALENA PIASECKA
ROBERT KAZAŁA, ARTUR PIASECKI 116

Zależności kryterialne liczby Nusselta dla przepływu wybranych płynów chłodniczych w minikanałach prostokątnych wyznaczone metodami uczenia maszynowego z wykorzystaniem odtwarzalnej procedury przetwarzania danych eksperymentalnych
MAGDALENA PIASECKA 117

Wrzenie w przepływie w minikanale prostokątnym: pomiary eksperymentalne, wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła i porównanie z zależnościami kryterialnymi z literatury
RADOSŁAW JANKOWSKI, MAGDALENA PIASECKA 119

Określenie intensywności wymiany ciepła na powierzchniach rozwiniętych podczas wrzenia etanolu
NORBERT DADAS, ROBERT PASTUSZKO 121

Badania eksperymentalne oraz symulacje CFD przepływu i wymiany ciepła w minikanale pierścieniowym
KRZYSZTOF GALISZEWSKI, MAGDALENA PIASECKA, PAWEŁ ŁABĘDZKI 122

Optymalizacja porowatości w wymiennikach TPMS 316L wytwarzanych metodą SLM: równoważenie intensyfikacji wymiany ciepła i zużycia energii
MARCIN KRUZEL, TADEUSZ BOHDAL
KRZYSZTOF DUTKOWSKI, GRZEGORZ ROBAKOWSKI 123

Experimental study of capillary film asymmetry – comparison with existing liquid film thickness correlations
ANDRZEJ I. NOWAK, TOMASZ DURAZIŃSKI
DAISUKE TSUNEOKA, JUNNOSUKE OKAJIMA 125

Physics-Informed Generative Design of Hybrid TPMS Compact Heat Exchanger Cores using Neural Operators
MOIZUDDIN S. KHAJA, DARIUSZ MIKIELEWICZ 127

Analiza oporów przepływu i wymiany ciepła podczas wrzenia czynników chłodniczych w miniszczelinie pierścieniowej
WOJCIECH WOLAK, SYLWIA HOŻEJOWSKA, MAGDALENA PIASECKA 128

Wpływ stężenia roztworu glikolu propylenowego na sprawność
IZABELA CĘKIEL, ROBERT PASTUSZKO, ROBERT KANIOWSKI 130

Badanie wrzenia czynników chłodniczych w kompaktowym wymienniku ciepła wykonanych technologią przyrostową
TADEUSZ BOHDAL, MARCIN KRUZEL, GRZEGORZ ROBAKOWSKI 131

Badania nieustalonej pracy przemysłowych wymienników ciepła przy użyciu modeli matematycznych stanu ustalonego po stronie czynnika o niższym strumieniu pojemności cieplnej
MARIUSZ GRANDA, MARCIN TROJAN 132

Experimental Investigation of R32 and R407C Condensation in Additively Manufactured 316 Stainless Steel Microchannel Heat Exchangers
MATEUSZ KOSTRZEWSKI, WALDEMAR KUCZYŃSKI, KATARZYNA CHLISZCZ 134

Thermal Performance Evaluation of Nanofluid-Based Heat Exchangers
DOMINIK BUKSA, ELŻBIETA FORNALIK-WAJS
PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY, JAN WAJS 135

Dalsze spostrzeżenia o warunkach powierzchniowej wymiany ciepła dla thermal-FSI oraz ich eksperymentalnych i numerycznych realizacjach
PIOTR JÓZEF ZIÓŁKOWSKI, BARTOSZ KRASZEWSKI, JANUSZ TELEGA
JAROSŁAW KARWACKI, RYSZARD SZWABA, JANUSZ BADUR 137

Eksperymentalna ocena zastosowania ferronanocieczy w chłodzeniu przepływowym elementu elektronicznego
OSKAR KAFKA, GABRIELA BĘBEN-KUCHARSKA
ROBERT MULKA, BARTOSZ ZAJĄCZKOWSKI 138

Experimental Assessment of Mass Transfer Process in Marine Ejector Scrubbers
JERZY GAGAN, KAMIL ŚMIERCIEW, DARIUSZ BUTRYMOWICZ
MICHAŁ ŁUKASZUK, PAWEŁ JAKOŃCZUK, ADAM DUDAR
MATEUSZ KĘDZIERSKI,TADEUSZ ZIELIŃSKI 140

Rozdział 10. Systemy energetyczne, OZE i magazynowanie energii 143

Modelling thermodynamic processes in salt caverns for hydrogen storage
MAGDALENA SZYMKIEWICZ, TOMASZ SOBOTA 144

Symulacje numeryczne pracy zdecentralizowanego urządzenia wentylacji fasadowej z wykorzystaniem wymienników z materiałem zmiennofazowym
BEATA GALISZEWSKA 145

Efektywność integracji rozproszonych źródeł energii z niskotemperaturową siecią ciepłowniczą w procesie transformacji energetycznej osiedli mieszkalnych
DAMIAN ŁADNY, DOROTA CHWIEDUK 147

Hybrid Energy Storage System Using Post-Mining Infrastructure (HESS)
ALEKSANDER ROŻEK 149

Analiza wpływu temperatury dolnego źródła ciepła na parametry pracy powietrznej pompy ciepła
ARTUR KLONOWSKI, MAŁGORZATA SIKORA 151

Analiza numeryczna wpływu temperatury na efektywność procesu ciśnieniowo-powstrzymywanej osmozy
JULIUSZ WACHNICKI, PIOTR ŁAPKA 152

Integration of a heat pump with a fireplace in a combined system serving two residential buildings – the impact of modernization on the operation of a non-standard system
STANISŁAW DOKOWSKI, KATARZYNA ZWARYCZ-MAKLES 153

Metodyka eksperymentalnego wyznaczania równowagowego ciśnienia pary wodnej hydratów soli nieorganicznych
MATEUSZ MŁYNARCZYK, ŁUKASZ CIEŚLIKIEWICZ
PIOTR FURMAŃSKI, PIOTR ŁAPKA 154

Badania eksperymentalne charakterystyk pracy generatorów termoelektrycznych ze źródłami ciepła w postaci pianek metalowych nasyconych materiałem zmiennofazowym
PAWEŁ SZOSTAK, JERZY BANASZEK
MIROSŁAW SEREDYŃSKI, MACIEJ JAWORSKI 155

Zastosowanie zawiesiny lodowej w układzie chłodzenia powietrza kopalni – case study
ŁUKASZ MIKA, KAROL SZTEKLER, AGATA MLONKA-MĘDRALA,
EWELINA RADOMSKA, WOJCIECH NOWAK
ANDRZEJ GOŁDASZ, TOMASZ BUJOK, PIOTR BORUTA 157

The impact of energy storage and electric vehicle charging on self-consumption of energy from a photovoltaic system in a single-family home
ARTUR CEBULA, GABRIELA STACHURA-GAŁGAN, MONIKA PIWOWARCZYK 159

Zastosowanie zasobnika ciepła do wspomagania produkcji pary technologicznej w przemyśle chemicznym
TOMASZ SIMLA 160

Computational and experimental study of charging and discharging proces of a heat storage unit with phase change material
DANIEL SMYKOWSKI, BEATA PYTLIK, TOMASZ TIETZE, PIOTR SZULC 161

Application of Molten Salt Thermal Energy Storage as an Example of Decarbonization of Polish Combined Heat and Power Plants
KACPER SZTURGULEWSKI, KAMIL STASIAK, DARIUSZ MIKIELEWICZ 163

Sprzężony model chłodni przechowalniczej o parametrach skupionych i rozłożonych (0D–1D) z bilansem powietrza wilgotnego, transportem w złożu i weryfikacją pomiarową
DARIUSZ KARDAŚ, GRZEGORZ MIZERA 164

Optymalizacja częstotliwości czyszczenia skraplacza pary w oparciu o modelowanie wydajności cieplnej i symulację elektrociepłowni
MARCIN TROJAN, SZYMON WIELGUS, DAWID TALER
KAROL KACZMARSKI, PIOTR DZIERWA, WIKTOR BLICHARSKI 166

Application of rotodynamic and volumetric expanders for natural gas and other technical gases pressure reduction – a Review
JAKUB HOLENISZCZY, PIOTR KOLASIŃSKI 167

Air-based building-integrated photovoltaic/thermal system with impinging jets under real environmental conditions – experimental approach
JAKUB ŁUKASIK, JAN WAJS 168

Analiza możliwości pracy współczesnych hybrydowych systemów energetycznych z wykorzystaniem AI
MAŁGORZATA LESZCZYŃSKA-DOMAŃSKA, ROMAN DOMAŃSKI 169

The experimental investigation of the Organic Rankine Cycle – Thermal Energy Storage system
DAWID SOWA, PIOTR KOLASIŃSKI, SZYMON LECH 171

Experimental Comparison of Ejector-Driven and Compressor-Driven Operation in a Hybrid Two-Phase Ejector-Vapour-Compression Refrigeration System
JERZY GAGAN, KAMIL ŚMIERCIEW, DARIUSZ BUTRYMOWICZ MICHAŁ ŁUKASZUK, PAWEŁ JAKOŃCZUK, ADAM DUDAR ANDRZEJ PAWLUCZUK, MATEUSZ PAWŁOWSKI 172

Experimental investigation of a heat pump system supported by a two-phase ejector operating as a pressure booster
JERZY GAGAN, ANDRZEJ PAWLUCZUK, KAMIL ŚMIERCIEW PAWEŁ JAKOŃCZUK, DARIUSZ BUTRYMOWICZ..... 174

Rozdział 11. Spalanie, biomasa i gospodarka odpadami 175

More than carbon: the expanding role of biochar in a circular economy
ANETA MAGDZIARZ, AGATA MLONKA-MĘDRALA, WOJCIECH JERZAK 176

Badania termiczne pirolizy węgla z biomasą w aspekcie gospodarki obiegu zamkniętego
AGNIESZKA KIJO-KLECZKOWSKA, MAGDALENA SZUMERA PAWEŁ RUTKOWSKI, MARCIN GAJEK, MAGDALENA LEŚNIAK JAROSŁAW KRZYWAŃSKI, WOJCIECH NOWAK, ADAM GNATOWSKI 178

Carbon gasification in CO_2 over ultra-porous coffee-waste biochar: reactivity and kinetics
WOJCIECH JERZAK, IZABELA KALEMBA-REC, ANETA MAGDZIARZ 180

Modelowanie numeryczne procesu odpylania w elektrofiltrze
ARKADIUSZ RYFA, JONASZ JANASZAK, NATALIA KOTUŁA MONIKA RASZTABIGA, JACK KRISTOFFERSSON, PAWEŁ KAK 182

Badania eksperymentalne i analiza CFD procesu separacji pyłu w cyklonie pracującym w strumieniu wysokotemperaturowych spalin z biomasy
SZYMON PIETER, DARIUSZ KARDAŚ 183

Praktyczny układ do efektywnej konwersji energii z biomasy
ROBERT ZARZYCKI, RAFAŁ KOBYŁECKI 184

Projekt i badania niskoemisyjnego biomasowego palnika pirolitycznego
MICHAŁ WANTUŁA, DARIUSZ KARDAŚ 185

Solwoliza odpadów tekstylnych jako kierunek odzysku surowców i energii
LYUDMILA SLOBODKINA, ROKSANA MUZYKA SZYMON SOBEK, MARCIN SAJDAK, SEBASTIAN WERLE 186

Badania eksperymentalne w otwartym sorpcyjnym magazynie ciepła z wykorzystaniem silikażelu
BARTŁOMIEJ WAJDA, ŁUKASZ CIEŚLIKIEWICZ, PIOTR ŁAPKA..... 188

Rozdział 12. Metrologia cieplna, modelowanie numeryczne i zagadnienia interdyscyplinarne 191

Wpływ parametrów klimatycznych na współczynnik przewodzenia ciepła wybranych izolatorów budowlanych
ROBERT KANIOWSKI, KAROLINA BĘBACZ ALEKSANDRA MALINOWSKA, RAFAŁ JAROSZ 192

Impulse pressure standard measurement uncertainty selected issues
KAROLINA CHROBOT, PIOTR CYKLIS 194

Modelowanie ruchu azotu w kriosaunie za pomocą CFD
SZYMON KNAP, PIOTR CYKLIS 196

Doświadczalne badania charakterystyk aerozolu wodnego w poddźwiękowym tunelu aerodynamicznym do badań zjawisk oblodzeniowych w lotnictwie
ALEKSANDRA ZARUBAJKO, ANDRZEJ J. PANAS
ŁUKASZ OMEN, MICHAŁ FRANT, MACIEJ MAJCHER..... 198

Badanie wpływu zmian rozmiaru szczeliny powietrznej między ubraniem ochronnym a symulatorem skóry na intensywność wymiany ciepła w trakcie wymuszenia radiacyjnego
JAKUB KOTYŃSKI, MATEUSZ WENDOŁOWICZ
ŁUKASZ CIEŚLIKIEWICZ, PIOTR ŁAPKA 200

Spectral entropy as a measure of the effectiveness of internally mounted pressure pulsation dampers
PRZEMYSŁAW MŁYNARCZYK, MICHAŁ PRĄCIK..... 201

Wpływ zestrojonego tłumika masowego, mocowanego wewnątrz rurociągu, na tłumienie pulsacji ciśnienia i wibracji rurociągu w instalacji sprężarki tłokowej
JAROSŁAW BŁĄDEK, PRZEMYSŁAW MŁYNARCZYK..... 202

Enhancement of thermal efficiency in a germicidal chamber using white-light-irradiated gold nanorods4
PIOTR RADOMSKI, PAWEŁ ZIÓŁKOWSKI, DARIUSZ MIKIELEWICZ..... 204

Zastosowanie metody lattice-Boltzmann (LBM) do modelowania przepływu w kropli przewodzącej cieczy w eksperymencie EWOD
ROMUALD MOSDORF, PIOTR MROZEK, GABRIELA RAFAŁKO..... 206

Entropia ruchu kropli wody w trakcie eksperymentu elektrozwilżania (EWOD)
Artur Nowicki, Gabriela Rafałko, Romuald Mosdorf, Piotr Mrozek 208

Optymalizacja Bayesowska w zagadnieniach odwrotnych do wyznaczenia parametrów krzywych sorpcji GAB
SZYMON ZDZIARSKI, MICHAŁ WASIK, PIOTR ŁAPKA..... 209

Determination of 2D transient temperature distribution in a horizontal chamber cross-section using transient outer surface measurements
JAN TALER, KAROL KACZMARSKI
DAWID TALER, PIOTR DZIERWA, MARCIN TROJAN 210

Model HEL do odwzorowania ruchu czerwonych krwinek (RBC) w sąsiedztwie płatków zastawki serca
WOJCIECH ADAMCZYK, KAROLINA BIGAJ, TOMASZ KRYSIŃSKI
ZBIGNIEW BULIŃSKI, MAREK ROJCZYK, SZYMON CABAN, ADAM GOLDA 211

Egzotermiczne utlenianie stopów cyrkonu parą wodną jako sprzężone źródło ciepła i wodoru w wodnych reaktorach jądrowych – model uproszczony
KACPER BURY, TOMASZ BURY 212

Analiza właściwości ablacyjnych kompozytu proszkowego modyfikowanego aerożelem, montmorylonitem i mullitem
ROBERT SZCZEPANIAK, PRZEMYSŁAW KULIK 214

Pomiar temperatury za pomocą nowego termometru w masywnej osłonie w zmiennych warunkach przepływowych przy wykorzystaniu metody odwrotnej
MAGDALENA JAREMKIEWICZ, MAREK MAJDAK 216

Simulation of He II Thermal Counterflow around Cylinders
MARCIN OPALSKI, PRZEMYSŁAW BŁASIAK, SŁAWOMIR PIETROWICZ..... 218

Computational Analysis of Moist Airflow Distribution in Underground Mine Roadways
KAMIL ŚMIERCIEW, JERZY GAGAN, DARIUSZ BUTRYMOWICZ 220

Hydraulic Maldistribution and Manifold Redesign in a Two-Phase Minichannel Heat Exchanger: A CFD Study
KAMIL ŚMIERCIEW, JERZY GAGAN, DARIUSZ BUTRYMOWICZ
MICHAŁ ŁUKASZUK, ANDRZEJ PAWLUCZUK, ADAM DUDAR..... 221

Komitet Naukowy

prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda – Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Jerzy Banaszek – Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Ryszard Białecki – czł. koresp. PAN, Politechnika Śląska
prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal – Politechnika Koszalińska
prof. dr hab. inż. Wojciech Bujalski – Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz – Politechnika Białostocka
dr hab. inż. Artur Cebula, prof. PK – Politechnika Krakowska
prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak, czł. rzecz. PAN – Politechnika Śląska
dr hab. inż. Tomasz Chmielniak, prof. AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
prof. dr hab. inż. Dorota Chwieduk – Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Janusz Cieśliński – Politechnika Gdańska
prof. dr hab. inż. Jacek Eliasz – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
dr hab. inż. Elżbieta Fornalik-Wajs, prof. AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
prof. dr hab. inż. Piotr Furmański – Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Zbigniew Gnutek – Politechnika Wrocławska
prof. dr hab. inż. Sławomir Grądziel – Politechnika Krakowska
prof. dr hab. inż. Dariusz Kardaś – Instytut Maszyn Przepływowych PAN
dr hab. inż. Rafał Kobyłecki, prof. PCz – Politechnika Częstochowska
prof. dr hab. inż. Janusz Kotowicz – Politechnika Śląska
prof. dr hab. inż. Piotr Krawczyk – Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Waldemar Kuczyński – Politechnika Koszalińska
dr hab. inż. Piotr Lampart, prof. IMP PAN – Instytut Maszyn Przepływowych PAN
prof. dr hab. inż. Janusz Lewandowski – Politechnika Warszawska
prof. dr hab. Aneta Magdziarz – Akademia Górniczo-Hutnicza
prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielewicz – czł. koresp. PAN, Politechnika Gdańska
prof. dr hab. inż. Jarosław Mikielewicz – czł. rzecz. PAN, Instytut Maszyn Przepływowych PAN
prof. dr hab. inż. Romuald Mosdorf – Politechnika Białostocka
prof. dr hab. inż. Stanisław Nagy – czł. koresp. PAN, Akademia Górniczo-Hutnicza
prof. dr hab. inż. Andrzej Nowak – Politechnika Śląska
prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak – Akademia Górniczo-Hutnicza
prof. dr hab. inż. Paweł Ocłoń – Politechnika Krakowska
prof. dr hab. inż. Andrzej Panas – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie
prof. dr hab. inż. Magdalena Piasecka – Politechnika Świętokrzyska
prof. dr hab. inż. Mieczysław Poniewski – Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Kazimierz Rup – Politechnika Krakowska
prof. dr hab. inż. Andrzej Rusin – Politechnika Śląska
dr hab. inż. Małgorzata Sikora, prof. PK – Politechnika Koszalińska
dr hab. inż. Tomasz Sobota, prof. PK – Politechnika Krakowska
prof. dr hab. inż. Aleksander Stachel – Akademia im. Jakuba z Paradyża w Gorzowie Wielkopolskim
prof. dr hab. inż. Wojciech Stanek – Politechnika Śląska
prof. dr hab. inż. Ireneusz Szczygieł – Politechnika Śląska
prof. dr hab. inż. Andrzej Szlęk – Politechnika Śląska
prof. dr hab. inż. Janusz Szmyd – Akademia Górniczo – Hutnicza
prof. dr hab. inż. Dawid Taler – Politechnika Krakowska
prof. dr hab. inż. Jan Taler – czł. koresp. PAN, Politechnika Krakowska
prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk – Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Janusz Terpiłowski – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie
dr hab. inż. Jan Wajs, prof. PG – Politechnika Gdańska
prof. dr hab. inż. Sebastian Werle – Politechnika Śląska
prof. dr hab. inż. Bohdan Węglowski – Politechnika Krakowska

dr hab. inż. Joanna Wilk, prof. PRz – Politechnika Rzeszowska
dr hab. inż. Zbigniew Zapałowicz, prof. ZUT – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
prof. dr hab. inż. Wiesław Zima – Politechnika Krakowska

Komitet Programowy

rof. dr hab. inż. Janusz Badur – Instytut Maszyn Przepływowych PAN
dr hab. inż. Łukasz Bartela, prof. PŚ – Politechnika Śląska
dr hab. inż. Artur Błaszczuk, prof. PCz – Politechnika Częstochowska
prof. dr hab. inż. Maciej Chorowski – Politechnika Wrocławska
prof. dr hab. inż. Michał Ciałkowski – Politechnika Poznańska
prof. dr hab. inż. Piotr Cyklis – Politechnika Krakowska
prof. dr hab. inż. Roman Domański – Instytut Lotnictwa, Sieć Badawcza Łukasiewicz
prof. dr hab. inż. Krzysztof Dutkowski – Politechnika Koszalińska
prof. dr hab. inż. Andrzej Frąckowiak – Politechnika Poznańska
dr hab. inż. Jerzy Gagan, prof. PB – Politechnika Białostocka
dr hab. inż. Sylwia Hożejowska, prof. PŚk – Politechnika Świętokrzyska
prof. dr hab. inż. Oleksandr Jewtuszenko – Politechnika Białostocka
dr hab. inż. Jacek Kalina, prof. PŚ – Politechnika Śląska
prof. dr hab. inż. Agnieszka Kijo-Kleczkowska – Politechnika Częstochowska
prof. dr hab. inż. Piotr Kolasiński – Politechnika Wrocławska
prof. dr hab. inż. Michał Kuciej – Politechnika Białostocka
dr hab. inż. Marcin Lackowski, prof. IMP PAN – Instytut Maszyn Przepływowych PAN
dr hab. inż. Beata Maciejewska, prof. PŚk – Politechnika Świętokrzyska
dr hab. inż. Paweł Madejski, prof. AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
dr hab. inż. Łukasz Mika, prof. AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
prof. dr hab. inż. Beata Niezgoda-Żelasko – Politechnika Krakowska
dr hab. inż. Robert Pastuszko, prof. PŚk – Politechnika Świętokrzyska
prof. dr hab. inż. Halina Pawlak-Kruczek – Politechnika Wrocławska
dr hab. inż. Sławomir Pietrowicz, prof. PWr – Politechnika Wrocławska
dr hab. inż. Piotr Piątkowski, prof. PK – Politechnika Koszalińska
prof. dr hab. inż. Jacek Pozorski – Instytut Maszyn Przepływowych PAN
dr hab. inż. Grzegorz Przybyła, prof. PŚ – Politechnika Śląska
prof. dr hab. inż. Artur Rusowicz – Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Robert Sekret – Politechnika Częstochowska
dr hab. inż. Robert Smusz, prof. PRz – Politechnika Rzeszowska
prof. dr hab. inż. Marcin Szega – Politechnika Śląska
prof. dr hab. inż. Jacek Smołka – Politechnika Śląska
dr hab. inż. Piotr Szulc, prof. PWr – Politechnika Wrocławska
dr hab. inż. Kamil Śmierciew, prof. PB – Politechnika Białostocka
prof. dr hab. inż. Artur Tyliszczak – Politechnika Częstochowska
prof. dr hab. inż. Tomasz Wiśniewski – Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Bartosz Zajączkowski – Politechnika Wrocławskaa

Komitet Organizacyjny

Przewodniczący: prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz
Wiceprzewodniczący: prof. dr hab. inż. Michał Kuciej, prof. dr hab. inż. Romuald Mosdorf
Sekretarz: dr inż. Paweł Jakończuk
Członkowie: prof. dr hab. Oleksandr Jewtuszenko, dr hab. inż. Kamil Śmierciew, prof. PB,
dr hab. inż. Jerzy Gagan, prof. PB, dr inż. Gabriela Rafałko, dr inż. Katarzyna Topczewska

Słowo wstępne

Szanowni Państwo,
w imieniu Komitetu Organizacyjnego serdecznie dziękujemy za udział w **XXVI Zjeździe Termodynamików**, który odbywa się w dniach **8–11 września 2026 roku w Augustowie**. To prestiżowe wydarzenie organizowane jest pod auspicjami Komitetu Termodynamiki i Spalania Polskiej Akademii Nauk. Decyzją Komitetu tegoroczna, dwudziesta szósta edycja najważniejszego spotkania polskiego środowiska naukowego, zajmującego się szeroko rozumianą termodynamiką, została powierzona zespołowi Politechniki Białostockiej. Jest to dla nas ogromny zaszczyt, tym bardziej, że białostockie środowisko akademickie po raz pierwszy w historii pełni rolę gospodarza Zjazdu. Mamy nadzieję, że Augustów – położony nad jeziorami Necko i Rospuda – stworzy Państwu doskonałe warunki zarówno do udziału w obradach naukowych, jak i do mniej formalnych spotkań, sprzyjających wymianie doświadczeń oraz nawiązywaniu nowych kontaktów naukowych.

W programie XXVI Zjazdu Termodynamików znalazło się **125 referatów**, prezentowanych podczas wykładów wiodących, sesji plenarnych i sesji posterowych. Program odzwierciedla najważniejsze kierunki badań rozwijane obecnie przez polskie środowisko termodynamiczne. Obejmuje zarówno badania podstawowe, jak i prace realizowane we współpracy z przemysłem oraz projekty prowadzące do praktycznych wdrożeń. W prezentowanych referatach widoczne są nowe kierunki rozwoju termodynamiki, wynikające z wyzwań współczesnej energetyki, transformacji energetycznej oraz rozwoju nowoczesnych technologii konwersji energii. Szczególnie cieszy rosnąca interdyscyplinarność prowadzonych badań oraz ich wyraźne ukierunkowanie na zastosowania inżynierskie.

Jeżeli za symboliczny początek termodynamiki uznać opublikowaną w 1824 roku rozprawę Sadi Carnota *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (*Rozważania o sile poruszającej ognia*), dyscyplina ta liczy już ponad dwieście lat. Mimo tak bogatej historii pozostaje niezwykle dynamicznie rozwijającą się dziedziną nauki. Współczesne badania obejmują nie tylko klasyczne zagadnienia wymiany ciepła i konwersji energii, lecz także nowe wyzwania związane ze zrównoważonym rozwojem, dekarbonizacją gospodarki, magazynowaniem energii oraz wykorzystaniem zaawansowanych metod obliczeniowych i sztucznej inteligencji w analizie procesów cieplnych. Równie imponującą historię ma sam Zjazd Termodynamików, którego tradycja sięga niemal siedemdziesięciu lat. W niniejszej księdze zamieszczamy zestawienie dotychczasowych edycji Zjazdu, przygotowane na podstawie opracowania organizatorów jubileuszowego XXV Zjazdu Termodynamików z 2023 roku.

Udział w tegorocznej edycji potwierdziło około **150 uczestników**. Oprócz tradycyjnych wykładów wiodących, sesji plenarnych i posterowych, po raz pierwszy wprowadziliśmy do programu **sesje panelowe**, poświęcone najważniejszym wyzwaniom stojącym przed środowiskiem naukowym oraz współczesną termodynamiką. W programie znalazły się następujące panele dyskusyjne:

- **Między energetyką węglową a technologiami transformacji energetycznej – otwarte pytania epoki zmian energetyki cieplnej**;
- **Jak uczyć o entropii, by nie siać chaosu – nowoczesna dydaktyka termodynamiki**;

- **Innowacja pod ciśnieniem – bariery, katalizatory wdrożeń i lekcje z przemysłu**;
- **Stan równowagi czy twórczy nieporządek? O kondycji środowiska termodynamicznego**.

Do udziału w panelach zaprosiliśmy wybitnych przedstawicieli środowiska akademickiego oraz ekspertów reprezentujących przemysł. Liczymy, że dyskusje staną się inspiracją do dalszych badań, nowych inicjatyw naukowych i zacieśnienia współpracy między nauką a gospodarką.

Mamy nadzieję, że XXVI Zjazd Termodynamików będzie dla Państwa nie tylko okazją do prezentacji wyników badań, lecz także miejscem inspirujących dyskusji, wymiany doświadczeń oraz nawiązania nowych kontaktów naukowych. Życzymy Państwu owocnych obrad, wielu wartościowych spotkań oraz miłego pobytu w Augustowie.

Z wyrazami szacunku
Komitet Organizacyjny
XXVI Zjazdu Termodynamików

Historia Zjazdów Termodynamików

Na podstawie zestawienia opracowanego przez Komitet Organizacyjny XXV Zjazdu Termodynamików

XXV Zjazd Termodynamików (Gdańsk, 11–14 września 2023)
Organizator – Instytut Energii Politechniki Gdańskiej
Liczba referatów – 133

XXIV Zjazd Termodynamików (Warszawa, 27–30 października 2020 – konferencja online)
Organizator – Instytut Techniki Cieplnej, Politechnika Warszawska
Liczba referatów – 34

XXIII Zjazd Termodynamików (Beskid Śląski, 19–22 września 2017)
Organizator – Instytut Techniki Cieplnej, Politechnika Śląska
Liczba referatów – 111

XXII Zjazd Termodynamików (Polańczyk, 23–27 września 2014)
Organizator – Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, Politechnika Rzeszowska,
Liczba referatów – 148

XXI Zjazd Termodynamików (Poznań, 4–7 września 2011)
The 1st International Congress on Thermodynamics
Organizator – Katedra Techniki Cieplnej, Politechnika Poznańska
Liczba referatów – 116

XX Zjazd Termodynamików (Wrocław, 2–6 września 2008)
Organizator – Zakład Termodynamiki, Instytut Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów,
Politechnika Wrocławska
Liczba referatów – 184

XIX Zjazd Termodynamików (Sopot, 5–8 września 2005)
Organizator – Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Cieplnej, Politechnika Gdańska
Liczba referatów – 164

XVIII Zjazd Termodynamików (Muszyna, 2–6 września 2002)
Organizator – Instytut Techniki Cieplnej, Politechnika Warszawska
Liczba referatów – 177

XVII Zjazd Termodynamików (Zakopane, 6–11 września 1999)
Organizator – Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych,
Instytut Aparatury Przemysłowej i Energetyki Politechnika Krakowska
Liczba referatów – 159

XVI Zjazd Termodynamików (Kołobrzeg, 3–7 września 1996)
Organizator – Politechnika Koszalińska
Liczba referatów – 115

XV Zjazd Termodynamików (Kokotek, 13–17 września 1993)
Organizator – Instytut Techniki Cieplnej, Politechnika Śląska
Liczba referatów – 112

XIV Zjazd Termodynamików (Kraków, 17–21 września 1990)
Organizator – Instytut Metalurgii Metali Nieżelaznych, Akademia Górniczo-Hutnicza
Liczba referatów – 124

XIII Zjazd Termodynamików (Kozubnik, 14–19 września 1987)
Organizator – Instytut Maszyn Cieplnych, Politechnika Częstochowska
Liczba referatów – 134

XII Zjazd Termodynamików (Rytro, 19–24 września 1984)
Organizator – Zakład Teorii i Pomiarów Maszyn Cieplnych,
Instytut Aparatury Przemysłowej i Energetyki, Politechnika Krakowska
Liczba referatów – 162

XI Zjazd Termodynamików (Świnoujście, 25–29 września 1981)
Organizator – Zakład Techniki Cieplnej, Instytut Budowy Maszyn, Politechnika Szczecińska
Liczba referatów – 132

X Zjazd Termodynamików (Michałowice, 22–29 października 1978)
Organizator – Instytut Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów, Politechnika Wrocławska
Liczba referatów – 118

IX Zjazd Termodynamików (Polańczyk, 16–22 listopada 1975)
Organizator – Instytut Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska
Liczba referatów – 69

VIII Zjazd Termodynamików (Krościenko, 16–21 czerwca 1972)
Organizator – Instytut Metalurgii, Akademia Górniczo-Hutnicza
Liczba referatów – 62

VII Zjazd Katedr Termodynamiki (Błażejewko, 16–20 września 1969)
Organizator – Katedra Teorii Maszyn Cieplnych, Politechnika Poznańska
Liczba referatów – 60

VI Zjazd Katedr Termodynamiki (Arturówek, 25–28 września 1967)
Organizator – Katedra Techniki Cieplnej, Politechnika Łódzka
Liczba referatów – 58

V Zjazd Jednoimiennych Katedr Termodynamiki (Czarlin, 14–19 czerwca 1965)
Organizator – Katedra Podstaw Techniki Cieplnej, Politechnika Gdańska
Liczba referatów – 40

IV Zjazd Jednoimiennych Katedr Termodynamiki (Warszawa-Bemowo, 19–21 września 1963)
Organizator – Katedra Silników Lotniczych i Termodynamiki, Wojskowa Akademia Techniczna
Liczba referatów – 51

III Zjazd Jednoimiennych Katedr Termodynamiki (Gliwice, 28–30 września 1961)
Organizator – Katedra Teorii Maszyn Cieplnych, Politechnika Śląska
Liczba referatów – 47

II Zjazd Jednoimiennych Katedr Termodynamiki (Kraków, 28–30 września 1959)
Organizator – Katedra Techniki Cieplnej, Politechnika Krakowska
Liczba referatów – 21

I Zjazd Jednoimiennych Katedr Termodynamiki, Pomiarów Cieplnych i Chłodnictwa
(Warszawa, 20–21 września 1957)
Organizator – Politechnika Warszawska
Liczba referatów – 10

ROZDZIAŁ 1
PROCESY TRANSPORTU I SPALANIA

Wybrane aspekty niestabilności procesu skraplania zamienników *F-gazów* w minikanałach

WALDEMAR KUCZYŃSKI
Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin
e-mail: waldemar.kuczynski@tu.koszalin.pl

Słowa kluczowe: minikanały, skraplanie, *F-gazy*

W monografi przedstawiono eksperymentalno-teoretyczną analizę zjawisk towarzyszących skraplaniu nowych proekologicznych czynników chłodniczych w minikanałach, w warunkach niestabilności dynamicznych. Powodem przeprowadzonych badań jest obecny stan prawny wymuszający wycofanie z użytkowania w maszynach i urządzeniach energetycznych dotychczas stosowanych czynników chłodniczych. Szczególnie istotna w tych zagadnieniach jest ustawa o tzw. *F-gazach,* szczegółowo definiująca zakres i sposób stosowalności tzw. starych oraz wprowadzanych w ich miejsce związków chemicznych.

W pracy zamieszczono ogólne wprowadzenie do zagadnień przepływów dwufazowych, a także nakreślono ogólnie stan prawny dotyczący wprowadzanych zmian w obiegu czynnikami chłodniczymi. Umieszczono w niej również zagadnienia związane z aktualnymi i perspektywicznymi standardami doboru nowych proponowanych do zastosowania czynników chłodniczych wraz z ogólną analizą aktualnego stanu wiedzy z zakresu opisu jakościowego i ilościowego charakterystycznych niestabilności przemiany fazowej skraplania czynników energetycznych realizowanej w minikanałach.

Wyniki badań eksperymentalnych, dotyczących wpływu niestabilności dynamicznych o charakterze jednostkowym na proces skraplania w mini kanałach substytutów *F-gazów* posłużyły do opracowania modeli matematycznych. Działania te dotyczą homogenicznych izomerów R1234, jako zamienników R134a i mieszani R507, R448A i R455A dla R404A jako substytut.

Dokonano weryfikacji modeli matematycznych opracowanych dla czynników R134a i R404A pod względem możliwości ich wykorzystania do obliczenia prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych i temperaturowych oraz wielkości dwufazowej strefy skraplania właściwego czynników chłodniczych R1234yf, R1234ze, R507, R448A i R455A. Analiza ta wykazała zadowalającą zgodność wyników obliczeniowych z eksperymentalnymi. Sprawdzane modele stosowane są w obliczeniach wpływu niestabilności dynamicznych o charakterze jednostkowym (impulsowym) na proces skraplania czynników chłodniczych w minikanałach. Modele te oparto o wykorzystanie funkcję regresji opisującej, jak zależy wartość oczekiwana zmiennej objaśnianej od zmiennych objaśniających.

Metoda obliczeniowa wykorzystana do określenia prędkości propagacji niestabilności ciśnieniowych v_p i temperaturowych v_T w postaci równań, oparta została o procedury analizy wymiarowej z uwzględnieniem teorematu Π-*Buckinghama*.

Wyniki obliczeń modelowych zweryfikowano badaniami eksperymentalnymi, uzyskując zadowalającą zgodność. Proponowane modele stanowią istotny materiał w opisie zjawisk towarzyszących skraplaniu czynników chłodniczych w minikanałach, w warunkach niestabilności dynamicznych jednostkowych.

Nieinwazyjne wyznaczanie sztywności ścian tętnicy szyjnej

WOJCIECH ADAMCZYK, JAN JUSZCZYK
MAREK ROJCZYK, ZIEMOWIT OSTROWSKI
MATEUSZ MESEK, RYSZARD BIAŁECKI

Politechnika Śląska, Katedra Techniki Cieplnej
ul. Konarskiego 22, 44-100 Białystok
e-mail: ryszard.bialecki@polsl.pl

Słowa kluczowe: sztywność ścian tętnic, USG, tonometria aplanacyjna, zadanie odwrotne, analiza wrażliwości, filtr Kalmana

Sztywność tętnic, która postępuje wraz z wiekiem lub w wyniku procesów chorobowych, zmniejsza zdolność do gromadzenia energii sprężystej w ścianach, obniża tłumienie oscylacji ciśnienia i zwiększa szybkość propagacji fal ciśnienia. Prowadzi to do rozwoju nadciśnienia, przerostu lewej komory serca oraz niszczenia delikatnych tkanek w narządach (nerkach, mózgu). Dlatego nieinwazyjne pomiary sztywności ściany są ważnym parametrem diagnostycznym. W pracy oceniono zmiany w geometrii tętnicy szyjnej za pomocą ultrasonografii, a ciśnienie tętnicze zmierzono tonometrem aplanacyjnym u 8 zdrowych ochotników. Na tej podstawie wyznaczono, za pomocą rozszerzonego filtru Kalmana, równoważny moduł Younga ściany tętnicy. Badane były wyniki trzech różnych modeli deformacji ścian tętnicy pod wpływem wewnętrznego ciśnienia: analitycznych modeli cienkościennego i grubościennego cylindra oraz numerycznego modelu dużych odkształceń dla materiału neo-Hookowskiego. Porównanie rozwiązań analitycznych z najbardziej zaawansowanym, ale obliczeniowo wymagającym modelem neo-Hookowskim, wykazało, że analityczny model grubościenny zapewnia rozsądną dokładność i może być stosowany w zastosowaniach klinicznych. Dodatkowo badanie wrażliwości przeprowadzono zarówno na danych *a priori*, jak i na modelu z asymilacją danych eksperymentalnych. Rozważano trzy parametry: promień wewnętrzny, promień zewnętrzny oraz liczbę Poissona. Wyniki wskazują na dużą wrażliwość zadania odwrotnego na błędy w pomiarze wewnętrznej średnicy, niewielką wrażliwość na trudny do uzyskania pomiar średnicy zewnętrznej i praktyczny brak wrażliwości na błędy w wyznaczaniu liczby Poissona.

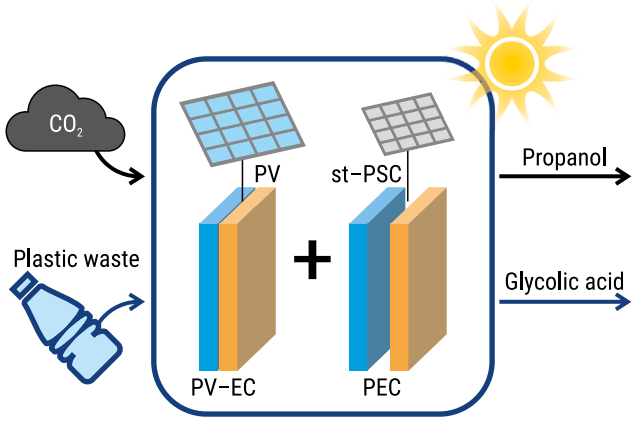
Fotoelektrycznie zintegrowane technologie energetyczne nowej generacji: Sprawności energetyczne reaktorów

JANUSZ KOTOWICZ, MATEUSZ BRZĘCZEK, DOMINIK HULAK

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice
e-mail: mateusz.brzeczek@polsl.pl

Słowa kluczowe: reaktor elektrochemiczny, reaktor foto-elektrochemiczny, n-propanol, PET, kwas glikolowy

Przedstawione badania zostały zrealizowane w ramach projektu Horyzont *PHOENIX*, którego celem jest opracowanie zasilanych energią słoneczną ścieżek jednoczesnej konwersji CO_2 oraz odpadów z tworzyw sztucznych PET do paliw i związków chemicznych o wysokiej wartości. Sercem analizowanej koncepcji technologicznej jest układ tandemowy złożony z dwóch komplementarnych reaktorów: elektrochemicznego (PV-EC) oraz foto-elektrochemicznego (PEC).



Idea układu tandemowego reaktorów PHOENIX

W reaktorze PV-EC energia elektryczna generowana przez moduły fotowoltaiczne zasila reakcje elektrochemiczne, których głównym celem jest redukcja CO_2 do CO. Bezpośrednia redukcja CO_2 obarczona jest stratami wynikającymi z karbonatyzacji, dlatego wprowadzenie etapu pośredniego w postaci CO umożliwia bardziej stabilną i skalowalną ścieżkę syntezy produktów wielowęglowych. Drugim elementem systemu jest reaktor PEC, w którym część energii dostarczana jest bezpośrednio z promieniowania słonecznego poprzez elektrodę fotoaktywną, natomiast pozostała część zapotrzebowania energetycznego pokrywana jest przez zintegrowany element fotowoltaiczny. W reaktorze

PEC następuje dalsza redukcja CO do produktów o wyższej wartości dodanej, w szczególności n-propanolu. Równocześnie po stronie anodowej obu reaktorów prowadzona jest kontrolowana oksydacja glikolu etylenowego (odzyskanego z depolimeryzacji PET), do kwasu glikolowego, co pozwala zastąpić energochłonną reakcję wydzielania tlenu i obniżyć wymagane napięcie pracy układu.

Kluczowym elementem przeprowadzonych badań było zdefiniowanie oraz ilościowe wyznaczenie sprawności energetycznych poszczególnych reaktorów oraz całego układu tandemowego. Sprawności określono z uwzględnieniem rzeczywistych napięć pracy, gęstości prądu oraz sprawności Faradaya dla głównych produktów elektrodowych. W analizie uwzględniono także potrzeby własne reaktorów oraz wpływ karbonatyzacji na efektywną dostępność CO_2 i selektywność procesu. Wyprowadzono zależności sprawności w funkcji wybranych parametrów procesowych. Sprawności oszacowano zarówno dla głównych produktów, jak i dla wszystkich produktów posiadających użyteczną wartość energetyczną, co umożliwiło kompleksową ocenę konwersji energii słonecznej, energii elektrycznej generowanej przez fotoelementy oraz energii chemicznej substratów w energię chemiczną produktów.

Teoria eksperymentu w procesach wymiany ciepła

JAROSŁAW MIKIELEWICZ[1], *DARIUSZ MIKIELEWICZ*[2]

[1] Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Fiszera 14, 80-231 Gdańsk
[2] Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: jarekm@imp.gda.pl, dariusz.mikielewicz@pg.edu.pl

Słowa kluczowe: planowanie eksperymentu, transport ciepła, energia, entropia

Badania eksperymentalne, w szczególności modelowanie fizyczne, są kluczowe, gdy bezpośrednie badanie rzeczywistych systemów jest niepraktyczne. Stosując teorię podobieństwa i wynikające z niej zmienne bezwymiarowe, umożliwiają wiarygodną analizę wyników. Chociaż same eksperymenty są często jakościowe i czasochłonne, łączenie ich z modelowaniem teoretycznym daje wiarygodniejsze wnioski ilościowe. Staranne planowanie badań eksperymentalnych, komputerowe gromadzenie danych oraz świadomość błędów pomiarowych zapewniają dokładność i efektywność uzyskanych wyników. Teoria podobieństwa definiuje kryteria, według których zachowanie modelu można uznać za reprezentatywne dla rzeczywistego systemu. Spełniając te kryteria, wyniki eksperymentalne uzyskane z modelu mogą być wiarygodnie ekstrapolowane na rzeczywiste zjawisko. Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie aktualnych doświadczeń Autorów w zaawansowanych badaniach z wykorzystaniem modeli i teorii podobieństwa. Niewłaściwe planowanie badań może prowadzić do błędów, których można uniknąć z dużym prawdopodobieństwem stosując testy statystyczne. Jednakże, możliwość popełnienia błędu istnieje zawsze z niezerowym prawdopodobieństwem, wskutek istnienia zakłóceń, które prowadzą do rozrzutu danych eksperymentalnych.

Monitoring of Thermal Stresses in Thick-Walled Boiler Components Using Inverse Heat Conduction Modelling

JAN TALER [1], PIOTR DZIERWA [2], DAWID TALER [2], KAROL KACZMARSKI [2]
MARCIN TROJAN [2], SŁAWOMIR GRĄDZIEL [1]

[1] Cracow University of Technology
Faculty of Environmental Engineering and Energy, Department of Energy
ul. Warszawska 24, 31-155 Krakow
[2] Cracow University of Technology, Faculty of Environmental Engineering and Energy
Department of Thermal Engineering and Air Protection
ul. Warszawska 24, 31-155 Krakow
e-mail: jan.taler@pk.edu.pl

Keywords: Inverse Heat Conduction Problem (IHCP), Thermal Stresses, Flexibility of Power Units, Monitoring of Pressure Components

The paper presents a review of methods for stress monitoring in boiler pressure components. Monitoring stresses in thick-walled boiler components, such as drums and headers, is essential for enhancing the operational flexibility of power units, which must frequently adapt to load changes and rapid start-ups caused by the integration of renewable energy sources. Because direct measurement of the inner surface temperature is hindered by high pressure and fluid velocity, researchers utilize Inverse Heat Conduction Problems (IHCP) to reconstruct these conditions from sensors located within the wall, typically placed 5 to 12.5 mm from the inner surface. One effective approach is the Control Volume Method (CVM), which divides the component wall into a direct region and an inverse region to extrapolate surface temperatures and heat fluxes accurately. To ensure the stability of these calculations against measurement noise, digital filters like Gram orthogonal polynomials are employed to smooth input data, while techniques such as "future time steps" help reduce sensitivity to random errors.

For real-time online monitoring, the complex geometry of components like drum-downcomer junctions is simplified using stress concentration factors for both pressure (and thermal loads. The total circumferential stress at critical points, such as hole edges, is calculated by multiplying the stress values of a non-weakened wall by these factors. While the Heat Transfer Coefficient (HTC) is necessary to determine the thermal stress concentration factor, studies show that even broad estimations of HTC do not significantly impact the accuracy of the concentration factor, making the method robust for industrial applications.

Compared to traditional methods based on the EN 12952-3 standard, which relies on quasi-steady-state assumptions and often leads to overly conservative heating times, modern optimized monitoring techniques can reduce start-up durations by approximately one-third. While the Finite Element Method (FEM) provides high-precision 3D analysis for complex geometries, it remains computationally intensive for online use and is primarily utilized to verify the accuracy of simplified monitoring models. Ultimately, these advanced monitoring systems allow thick-walled components to operate at maximum allowable rates, significantly improving the unit's lifespan and its ability to compensate for power fluctuations in the grid.

Measurement of unsteady fluid temperature using flat, cylindrical, and spherical thermometers

JAN TALER[1], TOMASZ SOBOTA[2], DAWID TALER[2], MAGDALENA JAREMKIEWICZ[2]

[1] Cracow University of Technology
Faculty of Environmental Engineering and Energy, Department of Energy
al. Jana Pawła II 37, 31-866 Cracow
[2] Cracow University of Technology
Faculty of Environmental Engineering and Energy
Department of Thermal Processes, Air Protection and Waste Management
ul. Warszawska 24, 31-155 Cracow
e-mail: jan.taler@pk.edu.pl

Keywords: fluid temperature measurement; transient temperature; plate, cylindrical, and spherical thermometers; inverse heat transfer problem; numerical verification; experimental studies

Controlling the transient temperature of a fluid is crucial in heat transfer research and in the diagnosis and control of energy processes (e.g. during sudden load changes, start-ups and transient states). Under such conditions, conventional temperature measurement, which is subject to the sensor's thermal inertia, results in significant errors and delays in response. The article presents a method for determining the actual fluid temperature from a temperature measurement inside the thermometer (at its centre or axis) by solving the inverse heat transfer problem.

The developed formulas for reproducing the fluid temperature and determining the surface heat flux are based on Burggraf's analytical solution to the inverse heat transfer problem. Three thermometer geometries were considered: a plate (slab), a solid cylinder, and a sphere, with the temperature measured at the central point (on the axis of the cylinder or in the centre of the sphere). A generalised mathematical model of the thermometer was proposed and developed using the finite volume method, enabling accurate calculation of the thermometer's response to given time changes in the fluid temperature.

An important element of the method is determining the heat transfer coefficient on the thermometer's outer surface from the sensor's response to a sudden change in fluid temperature. The heat transfer coefficient is determined by minimising the sum of the squares of the differences between the measured and calculated temperatures at the axis/centre of the thermometer. Then, using the assumed heat transfer coefficient, the fluid temperature is reconstructed from first-, second-, and third-order thermometer models.

The accuracy of the reconstruction was verified in two stages:

- numerically, using 'artificial measurement data' obtained from the reference model,
- experimentally, by comparing the calculated and measured temperature curves.

The root mean square error (RMSE) between the calculated and measured thermometer temperatures was used as a measure of the quality of the fit and the reliability of the reconstruction.

Analiza wyników badań dyfuzyjności cieplnej metodą LFA z zastosowaniem różnych modeli wymiany ciepła

RAFAŁ GAŁEK, JOANNA WILK
Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
al. Powstańców Warszawy 12, 35-029 Rzeszów
e-mail: joanwilk@prz.edu.pl

Słowa kluczowe: dyfuzyjność cieplna, laserowa metoda impulsowa, model Parkera, model Cape-Lehman, rozszerzalność cieplna

Laserowa metoda impulsowa (LFA – laser flash analysis) jest obecnie powszechnie stosowaną metodą wykorzystywaną w aparaturze komercyjnej do badań dyfuzyjności cieplnej materiałów w szerokim zakresie temperatur. Oprogramowanie takich aparatów zawiera modele wymiany ciepła, na bazie których, na podstawie przebiegu zmienności temperatury próbki oraz jej grubości, jest wyznaczana dyfuzyjność cieplna próbki materiału poddanej działaniu impulsu laserowego. W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki pomiarów dyfuzyjności cieplnej dwóch materiałów przemysłowych – stopów stosowanych m.in. w lotnictwie. Były to: Inconel 625 oraz aluminium 7075 – materiały o znacznej różnicy w wartości dyfuzyjności cieplnej. Badania przeprowadzono w szerokim zakresie temperatur – od temperatury otoczenia do temperatury bliskiej temperaturze topnienia danego materiału. Wartości dyfuzyjności cieplnej zostały określone za pomocą dwóch modeli wymiany ciepła zawartych w oprogramowaniu NETZSCH Proteus użytym do analizy wyników eksperymentu, stanowiącym wyposażenie wykorzystanego do badań aparatu LFA 427 firmy NETZSCH. Był to uproszczony model Parkera, w którym dyfuzyjność cieplna zależy bezpośrednio od grubości próbki oraz od czasu, po którym temperatura próbki osiągnie połowę wartości maksymalnej, oraz złożony model Cape-Lehman + pulse correction uwzględniający straty ciepła do otoczenia oraz efekt skończonej długości impulsu laserowego. W modelu złożonym wartość dyfuzyjności odtwarzana jest na drodze dopasowania – metodami nieliniowej regresji – parametrów modelu do zarejestrowanej eksperymentalnie zależności temperatury próbki od czasu. W określeniu dyfuzyjności cieplnej wzięto również pod uwagę wpływ rozszerzalności cieplnej badanych materiałów na wartość dyfuzyjności. W efekcie uzyskano cztery serie wyników badań z wykorzystaniem: – modelu Parkera bez uwzględnienia rozszerzalności cieplnej ε, – modelu Parkera z uwzględnieniem ε, – modelu Cape-Lehman + pulse correction (C–P+pc) bez uwzględnienia ε, – oraz modelu C–P+pc z uwzględnieniem rozszerzalności cieplnej. Uzyskane wyniki przeanalizowano ze względu na różnice w wartościach

dyfuzyjności cieplnej badanych materiałów. Określono wpływ temperatury oraz specyfiki danego modelu na wielkość dyfuzyjności, również w kontekście innych właściwości termofizycznych danego materiału – jego efektywności wymiany ciepła na drodze przewodzenia.

Zachowanie się płomienia wodorowego w warunkach wysokich ciśnień w atmosferze wzbogaconej w dwutlenek węgla

HALINA PAWLAK-KRUCZEK[1], PIOTR BOJARSKI[1]
MICHAL CZEREP[1], JAKUB MULARSKI[1], MATEUSZ KOWAL[1]
DARIUSZ PYKA[1], SYLWIA OLES[2], ARTUR POZARLIK[2]

[1]Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Wyb. Wyspiańskiego 27, 58-370 Wrocław
[2]University Twente, NL
e-mail: halina.pawlak@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: spalanie wodoru, ciśnieniowe spalanie, granice palności

W pracy analizowano problem oxy- spalania wodoru w warunkach podwyższonego ciśnienia w zakresie 10-50 bar w atmosferze utleniacza o zmiennym udziale tlenu z dwutlenkiem węgla oraz tlenu. Problem procesu oxy spalania wodoru w wysokich ciśnieniach badano eksperymentalnie i przy pomocy symulacji numerycznych. Badania zrealizowano w specjalnie zaprojektowanym stanowisku z palnikiem o 12u strumieniach w dyszy wlotowej naprzemiennie dla utleniacza i wodoru, stąd na wylocie tworzyły się mikro dyfuzyjne płomienie pozwalające na uzyskanie stabilnego zapłonu i spalania w szerokim zakresie strumieni wodoru i nadmiaru utleniacza rozcieńczonego dwutlenkiem węgla. Badania eksperymentalne oraz obliczenia symulujące procesu oxy spalania wodoru przeprowadzano dla współczynnika nadmiaru utleniacza 1.26 i mocy komory 42 kW i ciśnieniach w komorze 10, 20, 30, 40 i 50 barów.

Określano efekt ciśnień na wielkość rozkładu temperatury w komorze oraz stopień wypalenia oraz kształt płomienia. Jednym z istotnych barier dla spalania wodoru w wysokich ciśnieniach jest poziom temperatury ścianek komory stad zastosowano chłodzenie ścian komory dwutlenkiem węgla który recyrkulował do komory stycznie do ścianek wokół palnika poprzez 26 otworów.

Do chłodzenia wylotu spalin z komory został zaprojektowany wielostopniowy wymiennik ciepła.

W wyniku eksperymentów i obliczeń symulacyjnych przeprowadzonych dla różnych obciążeń komory od 10-42 kW uzyskano informacje jak rozcieńczenie dwutlenkiem węgla wpływa na stabilność spalania, granice palności, szybkość spalania i niedopał.

Badania i obliczenia numeryczne procesu spalania wodoru dla rosnących ciśnień wykazały istotne zmiany w rozkładzie temperatur w komorze spalania. Obszary najwyższych temperatur, dla wyższych ciśnień, występują w pobliżu wylotu z palnika.

Maksymalna temperatura w przypadku spalania wodoru wynosi od 1620°C przy 50 barach do 1530 przy 10 barach a średnie temperatury w komorze maleją ze wzrostem ciśnienia od 693°C do 612°C.

Analiza wpływu wielkości obszaru kompozytu pianka metaliczna–materiał zmiennofazowy na efektywny współczynnik przejmowania ciepła

MIROSŁAW SEREDYŃSKI, WOJCIECH PIÓRKOWSKI
JERZY BANASZEK, MACIEJ JAWORSKI

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa
e-mail: miroslaw.seredynski@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: pianka metalowa, materiał zmiennofazowy, symulacja numeryczna, współczynnik przejmowania ciepła, mikroskala

Materiały zmiennofazowe (PCM, ang. phase change materials) znajdują szerokie zastosowanie w magazynach energii cieplnej wykorzystujących ciepło przemiany fazowej ze względu na wysoką entalpię tej przemiany, quasi-izotermiczny jej przebieg, relatywnie niski koszt tych materiałów oraz ich ograniczone oddziaływanie na materiały konstrukcyjne. Ich istotnym ograniczeniem pozostaje jednak niski współczynnik przewodzenia ciepła, wynoszący zwykle około 0,2 W/(m·K), co w znacznym stopniu redukuje intensywność ładowania i rozładowania zasobników przy zadanej różnicy temperatur. W celu intensyfikacji transportu ciepła stosuje się między innymi żebra po stronie PCM, metaliczne pianki o otwartych porach nasycone PCM oraz zapewnienie warunków dla konwekcji naturalnej.

W niniejszej pracy rozpatrzono kompozyt pianka metaliczna–PCM w warunkach przemiany fazowej, przy założeniu braku konwekcji naturalnej w ciekłej fazie PCM. Modele makroskalowe tego rodzaju układów bazują na uśrednionych właściwościach efektywnych kompozytu oraz uśrednionym współczynniku przejmowania ciepła, co wynika ze znacznej złożoności geometrii pianki i niewielkich rozmiarów porów, często mniejszych niż 1 mm. Zasadne staje się zatem określenie wpływu wielkości analizowanego obszaru reprezentatywnego na uzyskiwane w symulacjach numerycznych wartości wymienionych parametrów.

Badaniom poddano kilka wirtualnych wycinków pianki metalicznej, o różnych wymiarach, wyodrębnionych z tego samego skanu mikrotomograficznego. Na podstawie analizy geometrycznej wyznaczono porowatość, natomiast na podstawie symulacji numerycznych określono średnie efektywne współczynniki przejmowania ciepła; oba parametry analizowano jako funkcję wielkości badanego obszaru. Uzyskane wyniki umożliwią oszacowanie niepewności wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła na podstawie analiz mikroskalowych realizowanych metodami CFD.

Thermodynamic modeling and analysis of supercritical coal-fired power plant operation integrated with carbon dioxide capture process

PAWEŁ MADEJSKI, NAVANEETHAN SUBRAMANIAN

AGH University of Krakow, Faculty of Mechanical Engineering and Robotics
Department of Power Systems and Environmental Protection Facilities
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland
e-mail: madejski@agh.edu.pl

Keywords: Rankine cycle, CO_2 capture, Post-combustion carbon capture, Supercritical coal-fired power plant, Thermodynamic modelling

Growing requirements for greenhouse gas emission reduction have made Carbon Capture and Storage (CCS) one of the key technologies for the decarbonization of conventional power generation. Among the available CCS technologies, post-combustion carbon capture (PCCS) based on chemical absorption using monoethanolamine (MEA) is considered the most suitable solution for retrofitting existing coal-fired power plants. However, the integration of PCCS with a steam power plant significantly affects the thermodynamic performance of the Rankine cycle. Steam extraction from turbine bleedings for solvent regeneration decreases the available expansion work in the low-pressure turbine, resulting in lower net power output and reduced cycle efficiency.

The objective of this study was to develop a comprehensive thermodynamic model of a supercritical double-reheat coal-fired power plant integrated with an MEA-based PCCS system and to evaluate its performance under various operating conditions. The complete power plant and carbon capture models were developed using Ebsilon® Professional, enabling detailed mass and energy balance calculations for the steam cycle, the CO_2 capture process, and auxiliary systems. The analysis focused on the influence of steam cycle parameters and different flue-gas flow rates directed to the PCCS unit on power generation, thermal efficiency, steam extraction demand, and CO_2 emission indicators.

The simulation results demonstrate that the application of a double-reheat steam cycle improves the thermodynamic efficiency of the Rankine cycle by increasing the average temperature of heat addition and reducing steam moisture at the final turbine stages. Nevertheless, integration with the PCCS system introduces a considerable energy penalty associated with solvent regeneration and CO_2 compression. Increasing the fraction of flue gas treated in the PCCS unit systematically reduces specific CO_2 emissions and increases the amount of captured carbon dioxide, but simultaneously decreases the net electrical output and overall plant efficiency due to higher steam extraction and auxiliary power consumption. The developed model also enables the evaluation of key environmental

and thermodynamic performance indicators, including Carbon Capture Ratio (CCR), specific CO_2 emissions, and Specific Primary Energy Consumption for CO_2 Avoided (SPECCA).

The proposed thermodynamic model provides a valuable tool for optimizing the operation of supercritical coal-fired power plants integrated with carbon capture systems. It enables the assessment of the trade-off between emission reduction and energy efficiency and supports the development of advanced low-carbon power generation technologies based on high-efficiency Rankine cycles equipped with post-combustion CO_2 capture.

ROZDZIAŁ 2
PROCESY CHŁODZENIA, UKŁADY CHŁODNICZE I POMPY CIEPŁA

Dynamiczne modelowanie procesu adsorpcji w układzie chłodniczym z uwzględnieniem geometrii poprzez sprzężenie z CFD

SZYMON JANUSZ [1,2], MARCIN BORCUCH [2], PIOTR CYKLIS [1]

[1] Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny
al. Jana Pawła II 37 31-864 Kraków
[2] M.A.S. Sp z o.o., Dział Badawczo – Rozwojowy
ul. Składowa 34, 27-200 Starachowice
e-mail:szymon.janusz@doktorant.pk.edu.pl

Słowa kluczowe: adsorpcja, urządzenia chłodnicze, CFD, model 0D, wymiana ciepła i masy

W pracy przedstawiono opracowanie i walidację dynamicznego modelu zero-wymiarowego (0D) opisującego działanie adsorpcyjnego układu chłodniczego opartego na cyklicznych procesach adsorpcji i desorpcji pary wodnej na stałym sorbencie. Model uwzględnia sprzężone równania bilansu masy i energii dla poszczególnych elementów instalacji, w tym adsorbera, parownika i skraplacza, a także zmienność masy, ciśnienia i temperatury w funkcji czasu. Ponadto model został opracowany w taki sposób, aby odwzorowywać cykliczną pracę dwuzłożowego urządzenia adsorpcyjnego, w którym procesy adsorpcji i desorpcji zachodzą naprzemiennie w obu złożach, co umożliwia symulację quasi-ciągłej pracy agregatu chłodniczego. Kluczową nowością zaproponowanego podejścia jest powiązanie modelu 0D z wynikami symulacji CFD, co pozwoliło na pośrednie uwzględnienie rzeczywistej geometrii wymienników ciepła oraz lokalnych zjawisk transportu ciepła i masy w uproszczonym, obliczeniowo wydajnym modelu wymiennika adsorpcyjnego.

Integracja danych z modelu CFD umożliwiła kalibrację efektywnych parametrów wymiany ciepła oraz charakterystyki zdolności sorpcyjnej, co znacząco poprawiło zdolność modelu 0D do odwzorowania dynamicznego zachowania układu. Dzięki temu zaproponowane narzędzie modelowe pozwala na szybkie symulacje pracy całego urządzenia, identyfikację ograniczeń procesowych oraz optymalizację kluczowych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, takich jak czas cyklu, temperatura regeneracji, warunki chłodzenia złoża czy parametry wymienników ciepła (np. powierzchnia wymiany ciepła i konfiguracja przepływu).

Proces walidacji przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie model CFD został zweryfikowany eksperymentalnie na stanowisku badawczym imitującym pracę adsorpcyjnego urządzenia chłodniczego w skali laboratoryjnej, co pozwoliło na potwierdzenie poprawności odwzorowania procesów wymiany ciepła i masy. Następnie rozbudowany

i skalibrowany model 0D poddano weryfikacji na rzeczywistym, pełnoskalowym układzie chłodniczym, porównując przewidywane przebiegi temperatur, ciśnień oraz strumieni masy i mocy chłodniczej z danymi pomiarowymi.

Uzyskane wyniki wykazują dobrą zgodność między symulacjami a eksperymentem, potwierdzając, że zaproponowane hybrydowe podejście łączące CFD z modelem 0D stanowi efektywne narzędzie do analizy, projektowania i optymalizacji adsorpcyjnych systemów chłodniczych.

Developing Large Air-Source Heat Pumps for District Heating: Design Challenges, System Integration, and Research Needs

JACEK KALINA
Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
e-mail: pawel.jakonczuk@pb.edu.pl

Keywords: air-source heat pumps, district heating, energy transition, decarbonisation

Europe has spent the last decade proving that district heating (DH) can be decarbonised. What is less clear, and far more important, is whether it can be done under today's local infrastructure, market and regulatory conditions. The most critical barrier identified across many district heating systems addressed with planning activities under LIFE Programme Co-funded SET_HEAT project is the deficiency of local renewable and waste heat sources, that could replace fossil fuels. In this context, large-scale air-source heat pumps (ASHPs) are emerging as a key technology for decarbonizing DH systems. The technology has been already tested in numerous installations across Europe proving that large-scale air-source heat pumps represent a technically viable but complex solution for district heating decarbonization. Currently, the largest ASHP is located in Silkeborg (DK): 22 MW_{th} heating capacity, supply temperature 75°C. ASHPs in the 100–200 MW class with a supply temperature >85°C are being considered. Currently, several suppliers are able to deliver 20 MW class ASHPs.

Large ASHPs and it offers an opportunity for using abundant source of heat, flexibility in unit placement, a unique solution for lowering water temperature in existing networks, and simpler administrative procedures are than in the case of groundwater or surface water source heat pumps. However, unlike small building-scale units, large ASHPs (1–50+ MW_{th} class) must operate under variable ambient conditions, high temperatures lifts, and stringent reliability requirements. This paper analyses the thermodynamic foundations, key design challenges, performance constraints, refrigerant selection, hydraulic integration, and grid interaction issues associated with large ASHP deployment in DH networks. Furthermore, it identifies critical research and development needs to enable cost-effective, high-temperature, and cold-climate operation at scale.

The main focus of this paper is put on thermodynamic cycle design and refrigerant selection. The Ebsilon Professional software has been used to develop models of four ASHPs based on the multi-stage cascade architectures, and following working fluids: R290, R744, R1234ze(E) and R717. Key performance parameters such as specific achievable

heating output, COP, pressures and temperatures in specific points of the cycle are examined. Results show that seasonal performance strongly depends on network supply temperature and transition to low-temperature networks dramatically improves viability. The calculations revealed that a typical ranking of working fluids in cold climates (i.e. –15°C ambient temperature) is 1. R717; 2. R290; 3. R744; 4. R1234ze

Historia rozwoju technologii pomp ciepła na świecie

MAŁGORZATA SIKORA
Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
ul. Racławicka 15-17, 75-620 Koszalin
e-mail: małgorzata.sikora@tu.koszalin.pl

Słowa kluczowe: pompy ciepła, historia rozwoju technologii, obiegi termodynamiczne, czynniki chłodnicze, efektywność energetyczna, dekarbonizacja ogrzewnictwa

Technologia pomp ciepła stanowi jedno z kluczowych rozwiązań w procesie dekarbonizacji ogrzewnictwa, a jej rozwój przebiegał wielotorowo, obejmując zarówno układy sprężarkowe, absorpcyjne oraz inne koncepcje konwersji energii. Celem opracowania jest syntetyczne przedstawienie historii rozwoju technologii pomp ciepła na świecie, z naciskiem na kamienie milowe w ewolucji obiegów termodynamicznych, czynników roboczych oraz rozwiązań konstrukcyjnych determinujących efektywność i niezawodność urządzeń. Omówiono genezę i upowszechnienie pomp sprężarkowych (od wczesnych zastosowań w chłodnictwie po współczesne układy, również wysokotemperaturowe), rozwój pomp absorpcyjnych (w tym systemów woda–bromek litu oraz amoniak–woda) oraz znaczenie układów hybrydowych i alternatywnych, takich jak pompy ciepła oparte na zjawiskach termoelektrycznych, magnetokalorycznych, adsorpcyjnych i eżektorowych. Przedstawiono również wpływ kryzysów energetycznych, zmian regulacji prawnych oraz ograniczeń środowiskowych na dobór czynników roboczych (od CFC/HCFC, przez HFC, po HFO i czynniki naturalne) oraz kierunki badań i komercjalizacji. W podsumowaniu wskazano główne trendy rozwojowe: wzrost temperatur zasilania w zastosowaniach przemysłowych i sieciowych, integrację z OZE i magazynami energii, cyfryzację sterowania oraz intensyfikację wymiany ciepła w celu ograniczania kosztów i poprawy efektywności sezonowej. Opracowanie porządkuje wiedzę historyczną w ujęciu technologicznym i wskazuje zależności między postępem w termodynamice, materiałoznawstwie i polityce klimatycznej a dynamiką rozwoju pomp ciepła.

Energetic and Exergetic Assessment of a Hybrid System Operating Under Real Conditions

ANNA MATYJA, WALDEMAR KUCZYŃSKI
Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
ul. Racławicka 15-17, 75-620 Koszalin
e-mail: anna.matyja@tu.koszalin.pl

Keywords: photovoltaics, heat pump, PV–HP hybrid system, energy analysis, exergy analysis, real operating conditions, energy efficiency, renewable energy sources.

The growing integration of renewable energy technologies in the building sector highlights the importance of hybrid systems combining photovoltaic installations with heat pumps. Previous studies indicate that the actual performance of both technologies is strongly dependent on variable operating conditions, such as fluctuations in solar irradiance, ambient temperature changes, and system configuration. Despite numerous energy and exergy analyses of PV installations, heat pumps, and their combinations, comprehensive evaluations based on measurement data from real operating conditions remain limited.

This study addresses that gap by providing an energetic and exergetic assessment of a hybrid PV–heat pump system operating under real conditions. The article presents a detailed description of the examined system, the applied measurement methodology, and the analytical approach, which includes energy balances, exergy loss analysis, and evaluation of system efficiency. The obtained results offer deeper insight into the dynamic interactions between system components and identify key factors influencing overall performance. The conclusions presented constitute a significant contribution to the development of efficient and resilient energy systems based on renewable energy sources.

Eksperymentalna analiza współpracy płaskich i próżniowych kolektorów słonecznych z adsorpcyjnym agregatem chłodniczym

MARCIN BORCUCH, DAWID POLEĆ, SZYMON JANUSZ

M.A.S. Sp. z o.o., Dział Badawczo – Rozwojowy
ul. Składowa 34, 27-200 Starachowice
e-mail: marcin.borcuch@mas-sp.pl

Słowa kluczowe: adsorpcja, chłodnictwo, kolektory słoneczne, energetyka odnawialna, hybrydowy system chłodniczy

W pracy przedstawiono eksperymentalną analizę wpływu zastosowania płaskich i próżniowych kolektorów słonecznych jako źródła wspomagającego zasilanie cieplne adsorpcyjnego agregatu chłodniczego realizującego cykliczne procesy adsorpcji i desorpcji pary wodnej na stałym sorbencie. Badania przeprowadzono na rzeczywistym, dwuzłożowym urządzeniu adsorpcyjnym produkcji M.A.S. o wydajności nominalnej 30 kW.

Motywacją dla podjętych badań jest fakt, że wiele zakładów przemysłowych dysponuje znacznymi strumieniami niskotemperaturowego ciepła odpadowego, które z uwagi na zbyt niską temperaturę nie mogą być bezpośrednio wykorzystane do efektywnej regeneracji złoża adsorpcyjnego. Z kolei w okresach letnich podaż energii słonecznej może być wystarczająca, aby samodzielnie zapewnić efektywną pracę agregatu adsorpcyjnego. Prowadzone są analizy współpracy kolektorów słonecznych z agregatami sorpcyjnymi głównie dla klimatów zwrotnikowych i podzwrotnikowych, gdzie natężenie promieniowania słonecznego jest znacznie korzystniejsze niż w warunkach klimatu umiarkowanego w Polsce.

Na podstawie badań eksperymentalnych określono, w jaki sposób udział energii słonecznej wpływa na stopień odciążenia podstawowego źródła ciepła, którym w stanowisku badawczym jest kocioł gazowy, oraz na warunki regeneracji złoża sorpcyjnego. Analizę przeprowadzono dla zakresu temperatur regeneracji od 70 do 90 °C, obejmującego typowe warunki pracy adsorpcyjnych agregatów chłodniczych. Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowanie kolektorów słonecznych umożliwia podniesienie temperatury medium do zakresu użytecznego dla procesów desorpcji, tworząc tym samym realną możliwość jego praktycznego wykorzystania w systemach chłodniczych.

W pracy przeanalizowano także wpływ wielkości powierzchni kolektorów słonecznych na pracę agregatu adsorpcyjnego w warunkach klimatu Polski. Określono zależności pomiędzy dostępnością promieniowania słonecznego, temperaturą medium grzewczego,

stopniem regeneracji złoża oraz osiąganą mocą chłodniczą, co pozwoliło na wskazanie zakresu powierzchni kolektorów niezbędnej do uzyskania rzeczywistych korzyści energetycznych dla analizowanego przypadku.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że odpowiednio dobrane i zintegrowane kolektory słoneczne mogą skutecznie podnieść temperaturę niskotemperaturowego ciepła odpadowego do poziomu użytecznego dla regeneracji złoża adsorpcyjnego, ograniczyć zużycie paliw konwencjonalnych oraz zwiększyć efektywność pracy adsorpcyjnego agregatu chłodniczego w warunkach klimatu umiarkowanego dla przedstawionej w pracy konfiguracji układu chłodniczego.

ROZDZIAŁ 3
WYMIENNIKI CIEPŁA

Identification of Nusselt Number Correlations for a Counterflow Helical Tube-in-Tube Heat Exchanger

JAN TALER [1], EWELINA ZIÓŁKOWSKA [2]
DAWID TALER [1], TOMASZ SOBOTA [1]

[1] Cracow University of Technology, Faculty of Environmental Engineering and Energy
ul. Warszawska 24, 31-155, Kraków, Poland
[2] Cracow University of Technology, CUT Doctoral School
Faculty of Environmental Engineering and Energy
ul. Warszawska 24, 31-155, Kraków, Poland
e-mail: jan.taler@pk.edu.pl, ewelina.ziolkowska@doktorant.pk.edu.pl
dawid.taler@pk.edu.pl, tomasz.sobota@pk.edu.pl

Keywords: tube-in-tube coil heat exchanger, heat transfer correlations, experimental testing, numerical method, least squares method

This study presents an experimental and numerical investigation aimed at identifying heat transfer correlations for a counterflow helical tube-in-tube heat exchanger. The analyzed device consists of a helically coiled inner tube placed concentrically inside an outer tube, with hot and cold water flowing in opposite directions. The countercurrent arrangement combined with coil curvature enhances heat transfer due to the development of secondary flow structures.

The experimental studies was conducted under operating conditions relevant to heat pump and energy recovery applications. The inlet and outlet temperatures of both working fluids, as well as their mass flow rates, were continuously recorded using a computerized data acquisition system. Only steady-state operating conditions were selected for further analysis.

Unknown coefficients in the Nusselt number correlations for both the inner tube and the annular space were determined simultaneously. The identification procedure was based on a numerical model derived from momentum and energy conservation equations for turbulent flow in helically coiled channels, accounting for curvature effects. The least squares method was applied to minimize the differences between measured and calculated outlet temperatures of the hot and cold fluids.

Statistical analysis was performed to estimate 95% confidence intervals for the identified coefficients. The developed correlations provide reliable predictive capability and can be applied in the thermal design, optimization, and performance analysis of counterflow helical tube-in-tube heat exchangers.

Optimization of the high-temperature heat exchanger design of a gas turbine system

DARIUSZ KARDAŚ, SYLWIA POLESEK-KARCZEWSKA
IZABELA WARDACH-ŚWIĘCICKA

Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk
ul. Fiszera 14, 80-231 Gdańsk
e-mail: sylwia.polesek-karczewska@imp.gda.pl

Keywords: Brayton cycle, externally-fired gas turbine system, high-temperature heat exchanger, design optimization

Systems of combined heat and power generation fueled with biomass have gained an increasing interest due to the growing demand for securing the energy demands, whilst meeting the goals of environmental safety and sustainability. Externally fired gas turbine system with heat regeneration, operated under the Brayton cycle, is one of the promising technologies, able to meet the local energy needs, offering a relatively simple design, viability and, simultaneously, high system efficiency.

In the paper, a small-scale system operated under the regenerative Brayton cycle is examined theoretically, aimed at the optimization of the design of a heat exchanger used to preheat the compressed air directed to the turbine. The exchanger is a key element that contributes to the system efficiency enhancement, but on the other hand, it accounts for a significant share of the total investment cost of the system. For this reason, its design optimization in terms of reducing the use of heat-resistant material and compactness is of significance. In the present work, the assumed input thermal energy is 150 kW. The study involves the calculations of the thermal and flow parameters of the cycle, integrated with the computations for a heat exchanger, using the developed in-house numerical codes. The thermodynamic calculations cover solving the system of energy balance equations for individual components, with the chemical reaction for biomass combustion incorporated. To determine the variable properties of the fluids, the RefProp database is utilized. The calculations for a heat exchanger, which is assumed counter flow shell-and-tube type, are based on the solution of a one-dimensional quasi-stationary model. It consists of stationary mass and momentum equations and a non-stationary energy equation, allowing to predict the thermal performance and pressure drops for the prescribed tube length and media inlet parameters, depending on the tube number. The predicted design parameters of the heat exchanger, i.e. dimensions, and thermal and flow parameters, are compared with the previously developed design of furnace-integrated type.

Sterowana nierównomierność rozpływu czynnika jako narzędzie minimalizacji generacji entropii w krzyżowoprądowym wymienniku ciepła

TOMASZ BURY, MAŁGORZATA HANUSZKIEWICZ-DRAPAŁA

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
e-mail: tomasz.bury@polsl.pl

Słowa kluczowe: generacja entropii, druga zasada termodynamiki, wymiennik ciepła, nierównomierność przepływu, CFD

Nierównomierność rozpływu czynników roboczych w wymiennikach ciepła jest zazwyczaj traktowana jako zjawisko niepożądane, prowadzące do obniżenia wydajności cieplnej, wzrostu strat ciśnienia oraz zwiększenia nieodwracalności procesów wymiany ciepła. Dotychczasowe badania koncentrowały się głównie na minimalizacji nierównomierności przepływu poprzez optymalizację kolektorów i geometrii kanałów. W niniejszej pracy przyjęto odmienne podejście badawcze, zakładające, że nierównomierność rozpływu cieczy może – w określonych warunkach – zostać wykorzystana jako narzędzie celowego kształtowania pól temperatury i redukcji generacji entropii.

Przedmiotem analizy jest jednorzędowy ożebrowany krzyżowoprądowy wymiennik ciepła, w którym zastosowano wielosekcyjny regulator natężenia przepływu wody, umożliwiający sterowanie rozpływem cieczy pomiędzy poszczególne rury. W badaniach porównano trzy warianty pracy: nierównomierny niekontrolowany, równomierny oraz nierównomierny kontrolowany, w którym rozkład strumienia masy wody dopasowano do zmierzonego rozkładu prędkości powietrza na wlocie do wymiennika.

Analiza oparta została na zwalidowanym modelu numerycznym CFD sprzężonym z modelem hydraulicznym, umożliwiającym wyznaczenie rzeczywistego rozpływu cieczy. W oparciu o pola temperatury i strumieni ciepła wyznaczono lokalną oraz całkowitą generację entropii, uwzględniając wkład związany z wymianą ciepła przy skończonej różnicy temperatury oraz z dyssypacją energii mechanicznej w przepływie.

Uzyskane wyniki wskazują, że wariant nierównomiernego, lecz kontrolowanego rozpływu cieczy prowadzi do zmniejszenia całkowitej generacji entropii w porównaniu zarówno z przypadkiem nierównomiernym niekontrolowanym, jak i z rozpływem równomiernym. Poprawa ta wynika z lepszego dopasowania lokalnych strumieni ciepła do przestrzennego rozkładu intensywności przepływu powietrza, co skutkuje redukcją ekstremalnych lokalnych różnic temperatury i bardziej równomiernym wykorzystaniem powierzchni wymiany ciepła.

Otrzymane rezultaty sugerują, że kontrolowana nierównomierność przepływu może stanowić świadome narzędzie projektowe, pozwalające na ograniczenie nieodwracalności procesów wymiany ciepła i poprawę sprawności termodynamicznej wymienników pracujących w warunkach nieidealnych.

Bidyspersyjne struktury porowate – badania eksperymentalne nad konwekcją Rayleigha-Bénarda

PAWEŁ DĄBROWSKI[1], MARK TUMMERS[2], KAMEL HOOMAN[2]

[1] Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Instytut Energii
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
[2] Delft University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering
Mekelweg 2, 2628 CF Delft
e-mail: pawel.dabrowski@pg.edu.pl

Słowa kluczowe: bidyspersyjne struktury porowate, BDPM, konwekcja swobodna, chłodzenie elektroniki, Rayleigh-Bénard

Dzięki centrom danych możliwe jest efektywne organizowanie, przechowywanie, przetwarzanie oraz udostępnianie danych cyfrowych. Jednym z ich kluczowych elementów infrastruktury, obok sprzętu elektronicznego, jest system chłodzenia, który musi zapewniać odpowiednią wydajność cieplną w celu zapobieżenia przegrzewaniu urządzeń, a w konsekwencji utracie danych. W związku z dynamicznym rozwojem sztucznej inteligencji, inżynierii obliczeniowej oraz przetwarzania w chmurze, zużycie energii elektrycznej przez systemy chłodzenia może stanowić nawet 45% całkowitego zapotrzebowania energetycznego centrów danych. Dodatkowo, rosnące gęstości strumienia ciepła generowane przez nowoczesne komponenty elektroniczne wymuszają opracowywanie zaawansowanych technologii chłodzenia. W ostatnich latach szczególną uwagę poświęca się technologiom chłodzenia cieczą, w tym zwłaszcza chłodzeniu zanurzeniowemu.

Chłodzenie zanurzeniowe polega na bezpośrednim zanurzeniu szaf rack w cieczy chłodzącej, która odbiera ciepło z powierzchni urządzeń elektronicznych. Ze względu na znaczną wysokość szaf rack, w analizach nie można pominąć wpływu konwekcji naturalnej. Dodatkowym wyzwaniem modelowania jest niejednorodna struktura urządzeń elektronicznych, które nie stanowią monolitycznych obiektów wykonanych z jednego materiału. Z tego względu powinny być one traktowane jako media porowate (MDPM). Ponadto rozmieszczenie wielu szaf rack w przestrzeni chłodzonej prowadzi do powstania układu o charakterze bidyspersyjnej struktury porowatej (BDPM), co dodatkowo komplikuje analizę transportu ciepła.

Celem pracy jest szczegółowa analiza eksperymentalna układów typu MDPM oraz BDPM w warunkach konwekcji naturalnej typu Rayleigha–Bénarda (Ra-Be). Oprócz podstawowych analiz obejmujących wpływ liczby Rayleigha oraz mikroporowatości na intensywność wymiany ciepła, zbadano i scharakteryzowano różnice pomiędzy

konfiguracjami przyłączonymi i odłączonymi. W przypadku geometrii odłączonych przeanalizowano również wpływ zróżnicowanej odległości pomiędzy medium porowatym a ścianą.

Wyniki eksperymentalne wskazują, że w konfiguracji przyłączonej liczba Nusselta wzrasta wraz ze wzrostem mikroporowatości BDPM. Ponadto stwierdzono intensyfikację wymiany ciepła dla konfiguracji odłączonej wraz ze zwiększaniem odległości BDPM od ściany. Uzyskane wyniki umożliwiły opracowanie nowych korelacji liczby Nusselta, które mogą znaleźć zastosowanie w obliczeniach projektowych związanych z technologią chłodzenia zanurzeniowego.

Badania przedstawione w niniejszej pracy zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu OPUS 27 nr 2024/53/B/ST8/02699 w latach 2025–2028

ROZDZIAŁ 4
PROCESY PRZEMIAN FAZOWYCH
I RURKI CIEPŁA

Dimensionless Analysis of Pool Boiling on a Tube Bundle at Low Pressure

DOMINIKA KACZMAREK-PIĄSTKA, TOMASZ HAŁON, BARTOSZ ZAJĄCZKOWSKI

Wroclaw University of Science and Technology
Faculty of Mechanical and Power Engineering, Department of Thermal Sciences
Wyb. Wyspianskiego 27, Wroclaw, 50370, Poland
e-mail: dominika.kaczmarek-piastka@pwr.edu.pl

Keywords: Pool boiling, subatmospheric pressure, dimensionless numbers, water

A dimensionless analysis of pool boiling on horizontal copper tubes arranged as a single tube and in tube bundle configurations is presented for pressures of 3–5 kPa and two hydrostatic conditions: base level (top tubes row covered by liquid) and 20 cm above top tubes. The study investigates the dependence of selected dimensionless numbers on saturation pressure, hydrostatic head, and imposed heat flux, and interprets their relevance in the context of bundle effects.

The modified Jakob (Ja*), Bond (Bo), Prandtl (Pr), and modified Peclet (Pe_{mod}) numbers were evaluated. The classical Jakob number represents the ratio of sensible heat to the latent heat of vaporization, it does not incorporate the influence of imposed heat flux; therefore, the modified Jakob number Ja* was applied [1]. The Bond number indicates whether gravitational forces or surface tension forces dominate in boiling [2]. The Prandtl number reflects the balance between hydrodynamic and thermal diffusion effects [3]. The modified Peclet number depends on heat flux, thermal diffusivity, latent heat of vaporization, vapor density, and the capillary length.

The onset of nucleate boiling (ONB) points for boiling on single tube correspond to Ja* values between 0.9 and 1.5, while the Bond number remains nearly constant (Bo ≈ 83.6–84.2). The modified Peclet number varies in the range 3.5×10^3–4.6×10^3 and the Prandtl number between 6.5 and 7.2. The modified Jakob number exhibits nearly identical values, as expected due to its explicit dependence on heat flux. The modified Peclet number shows similar values at 3 kPa; however, at 5 kPa and at 3 kPa with a 20 cm hydrostatic head above the heated tube, Pe_{mod} values in the tube bundle (tandem) configuration are slightly lower than in the single tube case. More pronounced differences are observed for the Bond and Prandtl numbers: the Bond number increases with imposed heat flux, whereas the Prandtl number decreases.

Dimensionless numbers such as the Bond number and the modified Peclet number are commonly used parameters in pool boiling analysis. In Sha et al. [4], these parameters were employed as the principal independent variables in the newly developed semi-empirical Nusselt number correlation for vertical tubes.

This research was funded in whole or in part by the National Science Centre, Poland grant number 2021/43/B/ST8/00882. For the purpose of Open Access, the author has applied a CC-BY public copyright licence to any Author Accepted Manuscript (AAM) version arising from this submission.

References

[1] Wojtasik, K., Rullière, R., Krolicki, Z., Zajaczkowski, B., & Bonjour, J. (2020). Subcooled boiling regime map for water at low saturation temperature and subatmospheric pressure. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *118*, 110150. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110150

[2] Giraud, F., & Tremeac, B. (2019). Influences of confinement on subatmospheric water vaporization phenomena in a vertical rectangular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *145*. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118725

[3] Giraud, F. (n.d.). *Vaporization of water at subatmospheric pressure : Fundamentals of boiling phenomena and path towards the design of compact evaporators for sorption chillers*. Retrieved https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01368517

[4] Sha, B. B., Mohanty, R. L., & Das, M. K. (2026). A critical analysis of correlations for saturated nucleate pool-boiling heat transfer over vertical tubes and tube bundles: Development of improved models. Progress in Nuclear Energy, 190. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105893

Intensyfikacja wrzenia pęcherzykowego przy zastosowaniu nanocząstek SiO_2

KAROLINA BĘBACZ[1], ROBERT KANIOWSKI[2], SYLWIA WCIŚLIK[3]

[1] Świętokrzyski Kampus Laboratoryjny Głównego Urzędu Miar
ul. Wrzosowa 46, 25-211 Kielce
[2] Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
al. 1000-lecia P.P. 7, 25-314 Kielce
Świętokrzyski Kampus Laboratoryjny Głównego Urzędu Miar
ul. Wrzosowa 46, 25-211 Kielce
[3] Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki
al. 1000-lecia P.P. 7, 25-314 Kielce
e-mail: karolina.bebacz@gum.gov.pl, kaniowski@tu.kielce.pl, sylwiazw@tu.kielce.pl

Słowa kluczowe: wrzenie pęcherzykowe, nanociecze, tlenek krzemu (SiO_2), wymiana ciepła

Rozpraszacze ciepła odgrywają kluczową rolę w nowoczesnych systemach chłodzenia, szczególnie w elektronice, energetyce, przemyśle chemicznym oraz technologiach kosmicznych, gdzie wymagane jest skuteczne odprowadzanie bardzo dużych strumieni cieplnych przy ograniczonych różnicach temperatur. Odpowiedni dobór materiałów, struktury powierzchni oraz cieczy roboczej pozwala na istotną intensyfikację procesów wymiany ciepła, zwiększając niezawodność i efektywność energetyczną układów. Wrzenie stanowi jeden z najskuteczniejszych mechanizmów odprowadzania ciepła. W niniejszej pracy przeanalizowano intensyfikację wymiany ciepła podczas wrzenia wody oraz mieszanin wody z dodatkiem tlenku krzemu (SiO_2) przy ciśnieniu atmosferycznym. Powierzchnie wymiany ciepła stanowiły próbki wykonane z miedzi o chropowatości Ra = 143 μm. Celem badań było określenie wpływu obecności nanocząstek SiO_2 w cieczy roboczej na gęstość strumienia ciepła oraz współczynnik przejmowania ciepła w warunkach wrzenia pęcherzykowego. Wykazano, że zastosowanie mieszanin wody z tlenkiem krzemu prowadzi do istotnej poprawy parametrów wymiany ciepła w porównaniu z wodą dejonizowaną. Maksymalna uzyskana gęstość strumienia ciepła osiągnęła wartość rzędu 1445 kW/m², natomiast współczynnik przejmowania ciepła przekroczył 35,8 kW/(m² K). Uzyskane wyniki potwierdzają, że zastosowanie mieszanin wody z dodatkiem tlenku krzemu może znacząco zwiększyć krytyczną wartość gęstości strumienia ciepła procesów chłodzenia opartych na wrzeniu, szczególnie w systemach wymagających intensywnego odprowadzania ciepła.

Experimental Study of Stainless-Steel Porous Wicks for a Water-Charged Flat Loop Heat Pipe Evaporator Operating at Moderate Temperatures

PAWEŁ SZYMAŃSK, DARIUSZ MIKIELEWICZ

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: pawel.szymanski@pg.edu.pl

Keywords: Loop Heat Pipe, Passive Transport, Elevated Temperatures, Heat Recovery,

This paper presents an experimental study of how the microstructure of 316L stainless-steel porous wicks governs the thermal–hydraulic performance and operating stability of a flat Loop Heat Pipe (F-LHP) charged with water in the 370–520 K saturation-temperature range. Three sintered wick structures with nominal pore radii of 3 μm, 4 μm and 6.5 μm were tested in the same evaporator and loop layout under identical boundary conditions to measure the role of pore geometry in capillary-driven liquid circulation. The wicks were characterised using porometry to quantify pore-size distributions, total and effective porosity, permeability and capillary capability; chemical composition was additionally verified to confirm 316L compliance and assess compatibility with water and prospective medium-temperature working fluids. System-level measurements comprised temperature fields versus applied heat load, wick-induced pressure drop and the resulting mass flow rate inferred from an energy balance with temperature-dependent latent heat.

The results reveal a clear dependence between operating temperature, wick pressure losses and transport capacity. Increasing saturation pressure reduced the available capillary head, narrowing the stable operating envelope and accelerating approach to the capillary limit, while rising heat input increased circulation until capillarity became insufficient to sustain continuous return flow. Across the full range, the smallest-pore wick delivered the most robust behaviour: it maintained the lowest evaporator temperature rise, delayed hydraulic instability and produced the highest mass flow rate, indicating strong resistance to vapour intrusion and dry-out. The intermediate wick showed stable performance only to moderate inputs, beyond which progressive deterioration of capillary pumping led to higher temperatures and flow saturation. Despite higher permeability, the largest-pore wick reached the limit first, exhibiting earlier pressure escalation, sharp thermal degradation and breakdown of continuous liquid transport at elevated temperature.

Overall, the study quantifies the classic permeability–capillarity trade-off for water-based F-LHPs near their upper practical temperature boundary and identifies the 3 μm structure as the most favourable compromise among the tested options. The dataset provides a benchmark for evaluating advanced wick architectures and alternative fluids aimed at extending passive heat-transport capability toward higher temperatures.

Beyond reporting comparative performance trends, the study provides a quantitative reference dataset for water-charged flat LHPs in the 370–520 K regime and a validated experimental framework for future qualification of improved wick architectures and alternative working fluids. As water approaches its transport limits in this temperature range, further advances will likely require microstructural optimisation beyond conventional sintered stainless-steel wicks and/or the introduction of fluids capable of stable operation toward ~700 K. The results therefore support ongoing development of compact, passive thermal control systems for aerospace, power electronics and other high heat-flux applications.

This research was carried out with the financial support of the Polish National Science Centre under the OPUS 24 grant (No. 2022/47/B/ST8/01490).

Experimental investigation of condensation heat transfer in an additively manufactured minichannel heat exchanger

KATARZYNA CHLISZCZ, WALDEMAR KUCZYŃSKI
Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin
e-mail: katarzyna.chliszcz@tu.koszalin.pl, waldemar.kuczynski@tu.koszalin.pl

Keywords: heat exchanger, additive manufacturing, selective laser melting (SLM), minichannel, condensation

Modern energy and refrigeration systems increasingly employ compact heat exchangers, which are characterized by high efficiency due to a large heat transfer area-to-volume ratio. However, their complex geometry, particularly the presence of minichannel structures, poses a significant technological challenge for conventional manufacturing methods. Therefore, additive manufacturing technologies are gaining increasing importance, as they are based on building components layer by layer. In this study, a compact minichannel heat exchanger was designed and manufactured using Selective Laser Melting (SLM) from stainless steel powders. Subsequently, the manufacturing quality was evaluated, including internal structure analysis using computed tomography, measurements of minichannel surface roughness, and determination of the actual channel diameters. The obtained results confirmed that the heat exchanger meets the design and quality assumptions, providing a basis for further research. Experimental investigations of the condensation process of the refrigerant R134a in the analyzed heat exchanger were also carried out. Based on the obtained results, the performance characteristics of the device were determined, including heat transfer rate, overall heat transfer coefficient, and condensation heat transfer coefficient of the refrigerant. The results are of significant importance for the development of modern compact devices used in refrigeration, air conditioning and electronics.

Symulacje i badania eksperymentalne ekspanderów zasilanych parą mokrą

WIESŁAW ZIMA, ARTUR CEBULA, KAROL MORAŃSKI
Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków
e-mail: wieslaw.zima@pk.edu.pl

Słowa kluczowe: dmuchawa powietrzna, sprężarka spiralna, para mokra, produkcja energii elektrycznej

Praca dotyczy innowacyjnego sposobu wykorzystania ciepła odpadowego do produkcji energii elektrycznej. Innowacyjność polega na realizacji cyklu, który rozpoczyna się i kończy w obszarze pary mokrej. Wymaga więc zastosowania ekspanderów dobrze tolerujących parę mokrą. Analizowanymi w pracy ekspanderami były dmuchawa powietrzna oraz sprężarka spiralna pracujące w cyklu odwróconym. W celu doboru tych urządzeń oraz prądnicy o odpowiednich parametrach wykonano wstępne obliczenia symulacyjne za pomocą oprogramowania Ebsilon Professional. Punktem wyjścia były w tym przypadku parametry pary nasyconej produkowanej przez kocioł olejowy będący na wyposażeniu laboratorium Katedry Energetyki Politechniki Krakowskiej. Istniejące stanowisko rozbudowano o układ wytwarzania pary mokrej o regulowanym stopniu suchości i zasilania nią ekspanderów. Stanowisko wyposażono także w układ akwizycji danych pozwalający na archiwizację wszystkich parametrów cieplno-przepływowych.

Zaprezentowano wybrane wyniki pomiarów i obliczeń obejmujące dwie serie pomiarowe. Seria pierwsza dotyczyła zastosowania dmuchawy powietrznej do pracy w cyklu odwróconym (jako ekspander). Podczas tych pomiarów ciśnienie względne pary mokrej na wlocie do ekspandera zmieniano od ok. 3,7 bara do ok. 4,7 bara przy jej stopniu suchości od ok. 0,7 do ok. 0,9. Strumień masy pary mokrej wahał się od ok. 460 kg/h do ok. 540 kg/h. Uzyskane wartości sprawności izentropowej były niewielkie i wahały się od ok. 3% do ok. 8%. Wartości mocy mierzone na zaciskach prądnicy także były niewielkie i wynosiły od ok. 40W do ok. 80W. Związane to było głównie z niewielką różnicą ciśnień pary na wlocie i wylocie z dmuchawy, wynoszącą ok. 0,5 – 0,7 bara oraz niewielką sprawnością mechaniczną dmuchawy. Druga seria pomiarowa dotyczyła zastosowania sprężarki spiralnej jako ekspandera. W tym przypadku ciśnienie względne pary mokrej na wlocie zmieniano od ok. 3 bar do ok. 9,5 bara. Strumień masy pary wahał się od ok. 35 kg/h do ok. 85 kg/h przy stopniu suchości od ok. 0,75 do ok. 0,88. W porównaniu z dmuchawą powietrzną uzyskano zdecydowanie większe wartości mocy (zmieniające się od ok. 700 W do ok. 4500 W) oraz sprawności izentropowej (od ok. 45% do ok. 75%). Związane to było głównie z rozprężaniem pary niemal do ciśnienia atmosferycznego

(w całym zakresie zmian ciśnienia pary na wlocie do ekspandera). W obu przypadkach nie zaobserwowano żadnych problemów eksploatacyjnych związanych z zasilaniem ekspanderów parą mokrą. Podobne badania nie były dotychczas realizowane.

ROZDZIAŁ 5
ZAGADNIENIA IMPLEMENTACJI TECHNOLOGII MATERIAŁOWYCH ORAZ TECHNOLOGII ADDYTYWNYCH W PROCESACH CIEPLNYCH

Wydajność termohydrauliczna wymienników ciepła TPMS wytwarzanych metodą addytywną: ocena eksperymentalna i skalowanie oparte na PEC

MARCIN KRUZEL, TADEUSZ BOHDAL
KRZYSZTOF DUTKOWSKI, JAN BORATYŃSKI

Politechnika Koszalińska
ul. Racławicka 15-17, 75-620 Koszalin
email: marcin.kruzel@tu.koszalin.pl, tadeusz.bohdal@tu.koszalin.pl
krzysztof.dutkowski@tu.koszalin.pl, jan.boratynski@tu.koszalin.pl

Słowa kluczowe: Potrójnieokresowe powierzchnie minimalne (TPMS); Kompaktowe wymienniki ciepła; wydajność termohydrauliczna; Kryterium oceny wydajności (PEC)

Niniejsza praca przedstawia eksperymentalne badania termohydrauliczne wymienników ciepła o potrójnie okresowej minimalnej powierzchni (TPMS) wytwarzanych metodą selektywnego topienia laserowego. Pięć topologii TPMS – Gyroid, Diamond, Primitive, Neovius i I-WP – zostało zbadanych w identycznych warunkach geometrycznych ($\varepsilon \approx 0{,}90$, $V = 3{,}10\times10^5$ mm^3), aby wyizolować wpływ topologii na wymianę ciepła i straty ciśnienia. Eksperymenty przeprowadzono w przeciwprądowej konfiguracji woda-woda w zakresie liczby Reynoldsa od $Re \approx 200$ do 2800, obejmującym reżimy laminarne i wczesne przejściowe.

Wszystkie struktury wykazują w przybliżeniu liniowy wzrost współczynnika przenikania ciepła przez konwekcję wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa, co wskazuje na konwekcję indukowaną topologią i trwałe rozerwanie warstwy granicznej. Topologia Neovius zapewnia najwyższą wydajność cieplną, osiągając współczynniki przenikania ciepła konwekcyjnego nawet o 35–50% wyższe niż w przypadku Gyroid i Diamond przy porównywalnych liczbach Reynoldsa i niezmiennie najwyższych liczbach Nusselta. Straty hydrauliczne rosną nieliniowo wraz z liczbą Reynoldsa dla wszystkich geometrii, a Neovius generuje największe spadki ciśnienia ze względu na bardzo kręte ścieżki przepływu. Pomimo tej wady, Neovius osiąga najkorzystniejszy bilans energetyczny, a kryterium oceny wydajności (PEC) przekracza jedność w całym zakresie liczby Reynoldsa i osiąga wartości do ~1,4 przy stałej mocy pompowania. Do wstępnego projektowania i optymalizacji wymienników ciepła TPMS zaproponowano korelacje potęgowe PEC ($R^2 > 0{,}94$) oraz ujednoliconą uogólnioną zależność skalowania.

Badanie wpływu modelu gęstości złoża proszku na końcowy kształt spoiny druku 3D

MIROSŁAW SEREDYŃSKI, TOMASZ ZATORSKI
DARIUSZ MISZCZYK, JERZY BANASZEK
Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa
e-mail: miroslaw.seredynski@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: druk 3D, proszek metalu, laserowe przetapianie metali, VOF, wieloskalowy model symulacyjny

W technologiach addytywnego wytwarzania części metalowych szczególne znaczenie ma proces selektywnego przetapiania złoża proszkowego wiązką laserową w atmosferze gazu obojętnego. Metoda ta umożliwia wytwarzanie geometrii niedostępnych dla klasycznych technik produkcyjnych przy zachowaniu wysokiej dokładności odwzorowania kształtu. Ograniczeniem procesu pozostaje jednak trudność w uzyskaniu ściegu o założonych parametrach geometrycznych i jakościowych, wynikająca z silnej zależności przebiegu topienia i krzepnięcia od parametrów technologicznych. Spośród licznych zmiennych procesowych kluczową rolę odgrywają moc lasera, średnica plamki oraz prędkość skanowania.

W konsekwencji istotnym zagadnieniem badawczym jest wyznaczenie zależności między podstawowymi parametrami procesu a geometrią formującego się ściegu. W tym celu prowadzi się eksperymenty referencyjne, w których w ściśle kontrolowanych warunkach wykonuje się ściegi, pojedyncze lub wielokrotne, stanowiące materiał porównawczy do walidacji modeli numerycznych.

Celem pracy jest analiza wpływu początkowej porowatości złoża proszku na końcowy kształt spoiny powstającej podczas pojedynczego przejścia wiązki laserowej. Rozpatrywany przypadek odpowiada warunkom benchmarku NIST z 2018 roku dla stopu Inconel 625 (AM Bench). Zaproponowano model średnioskalowy opracowany w środowisku ANSYS Fluent, w którym przyjęto płaską początkową powierzchnię złoża. Ewolucję swobodnej powierzchni ciekłego metalu, determinowaną oddziaływaniem napięcia powierzchniowego oraz ciśnienia odrzutu parującego metalu, opisano z wykorzystaniem modelu VOF. Transport ciepła i pędu w roztopionym metalu jest wywołany głównie przez konwekcję wywołaną siłami Marangoniego. Zjawiska topnienia i krzepnięcia uwzględniono w przedziale temperatur solidus–liquidus, natomiast uśrednione właściwości złoża powiązano z jego historią termiczną. Wyznaczenie położenia powierzchni zakrzepniętego materiału umożliwia model efektywnej gęstości złoża, uwzględniający histerezę właściwości materiałowych podczas przekraczania przedziału temperatury odpowiadającego przemianie fazowej.

W pracy porównane zostaną położenia swobodnej powierzchni zakrzepniętego stopu Inconel 625 wyznaczone dla różnych stopni upakowania złoża proszku, przy parametrach procesu odpowiadających jednemu z przypadków benchmarkowych NIST. Uzyskane wyniki pozwolą ocenić znaczenie przyjętego modelu gęstości złoża dla predykcji geometrii pojedynczej spoiny.

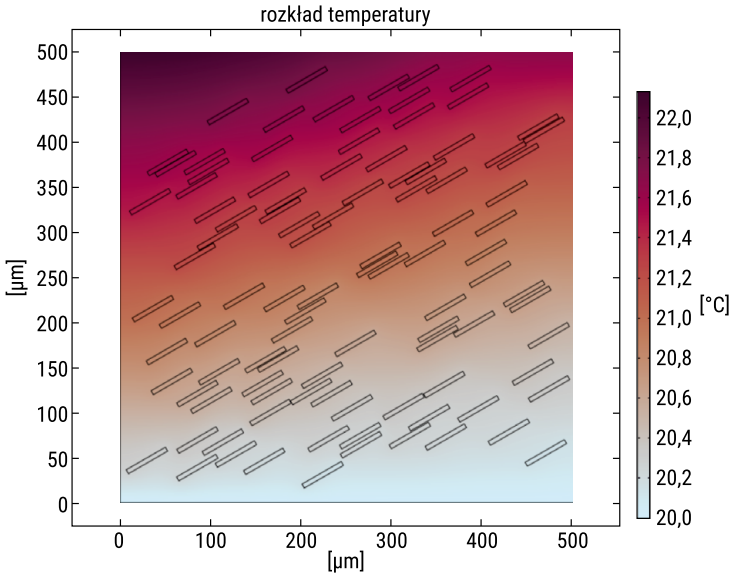
Modelowanie numeryczne wymiany ciepła w epoksydowym kompozycie dyspersyjnym z wypełnieniem w postaci anizotropowych inkluzji węglowych

MACIEJ KOWALSKI[1], *ŁUKASZ OMEN*[1], *ANDRZEJ J. PANAS*[1,2]

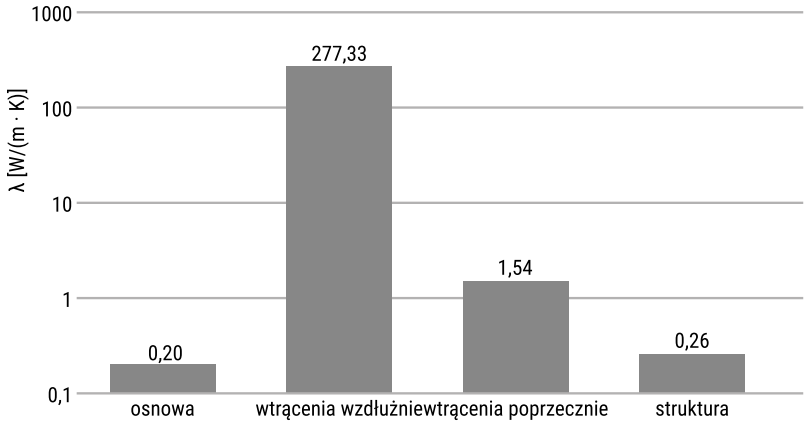
[1] Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
[2] Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa
e-mail: maciej.kowalski@wat.edu.pl

Słowa kluczowe: cieplnofizyczne właściwości wypadkowe, kompozyty dyspersyjne, anizotropia, homogenizacja

Inspirację do podjęcia omawianych w referacie badań stanowi problem kształtowania się i określania wypadkowych właściwości cieplnofizycznych niejednorodnych struktur materiałowych. Badania mają charakter teoretyczno-doświadczalny z położeniem nacisku na analizy numeryczne. Ze względu na problemy dużej rozpiętości proporcji wymiarów charakterystycznych poszczególnych faz, losowość położenia i anizotropię – często spotykane w strukturach kompozytowych – problem tzw. homogenizacji nadal jest dużym wyzwaniem i dla teorii, i w ujęciu metodologicznym. W przypadku modelowania numerycznego jedną z przeszkód do pokonania jest znaczny koszt obliczeniowy. W aspekcie metodologicznym rozważany problem koncentruje się na uproszczeniu procedury badań numerycznych celem ograniczenia ponoszonych kosztów obliczeniowych przy zachowaniu pełnej reprezentatywności charakteryzowanych efektów oraz uzyskiwanych rozwiązań w postaci efektywnych właściwości cieplnofizycznych. Przedmiotem analizy jest kompozyt dyspersyjny. Efektywne właściwości cieplnofizyczne takich kompozytów zależą zarówno od właściwości materiałowych poszczególnych składników jak i od uwarunkowań mikrostrukturalnych. W analizowanym przypadku mikrostruktura rozważanego obiektu cechuje się losowością w rozkładzie geometrycznym wtrąceń, co istotnie przekłada się na rzeczone właściwości, ale równocześnie utrudnia interpretację wyników badań doświadczalnych i jest wyzwaniem w przypadku modelowania analitycznego. W dwuwymiarowym modelu numerycznym analizowana jest stacjonarna i niestacjonarna wymiana ciepła w kontekście wyznaczania właściwości wypadkowych struktury kompozytu epoksydowego o wypełnieniu w postaci podłużnych inkluzji węglowych. W modelu uwzględniono zarówno anizotropię przewodności cieplnej inkluzji jak i wpływ ich orientacji geometrycznej (Rys. 1).



Rys. 1. Przykład rozwiązania dwuwymiarowego zagadnienia ustalonej wymiany ciepła w postaci pola temperatury elementarnej komórki dyspersyjnej struktury kompozytowej z uwzględnieniem losowości, kierunkowość i lokalnej anizotropii własciwości wtrąceń



Rys. 2. Porównanie właściwości składników struktury z wyznaczonym parametrem wypadkowym – wypadkowa przewodnością cieplną struktury dla modelowanego przypadku

Przypadek modelowy charakteryzuje się równoległymi inkluzjami o losowym rozmieszczeniu i ustalonym kącie odchylenia od głównego kierunku przewodzenia ciepła. W modelu numerycznym odtworzone zostały procedury dwóch rodzajów metod doświadczalnego wyznaczania właściwości cieplnofizycznych: stacjonarnej i stanów nieustalonych. dwie metody badawcze – stacjonarna (Poensgena) oraz niestacjonarna (zmodyfikowana metoda Angströma) celem porównania reprezentatywności i zgodności wyników uzyskanych tymi metodami. Uzyskane rezultaty, w postaci na przykład wyników przedstawionych na Rys. 2, pozwalają ocenić zakres stosowalności danych metod w opisie i analizie kompozytów dyspersyjnych o właściwościach silnie anizotropowych.

Wpływ struktury typu potrójnie periodyczna powierzchnia minimalna (TPMS) na krytyczną liczbę Reynoldsa w przepływie przez drukowany ze stali 316L wymiennik ciepła

KRZYSZTOF DUTKOWSKI [1], MARCIN KRUZEL [1]
TADEUSZ BOHDAL [1], MARIAN TRAFCZYŃSKI [2]
KRZYSZTOF WOŁOSZ [2], SŁAWOMIR ALABRUDZIŃSKI [2]

[1] Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
ul. Racławicka 15-17, 75-620 Koszalin
[2]Politechnika Warszawska
Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii w Płocku
ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock
e-mail: krzysztof.dutkowski@tu.koszalin.pl

Słowa kluczowe: druk 3D w metalu, wymiennik ciepła, powierzchnie minimalne, opory przepływu, badania eksperymentalne

Wymienniki ciepła zbudowane na bazie potrójnie periodycznej powierzchni minimalnej (TPMS) wykazują złożone wewnętrzne ścieżki przepływu płynu. Wynika to z ciągłej krzywizny powierzchni wymiany ciepła oraz jej zróżnicowanej geometrii, co powoduje lokalne przyspieszenie i spowolnienie przepływu. Cechy geometryczne powierzchni wymiany ciepła w wymienniku na bazie TPMS zasadniczo zmieniają stabilność przepływu i mogą znacząco przesunąć wartość krytycznej liczby Reynoldsa względem wartości znanych dla konwencjonalnych geometriami. Opisano wyniki badań eksperymentalnych wpływu gęstości (porowatości) struktury TPMS na przejście od laminarnego do turbulentnego przepływu w wymiennikach ciepła wytwarzanych metodą SLM (selective laser melting).

Zaprojektowano i wytworzono zestaw struktur TPMS o różnej porowatości, zachowując identyczne wymiary zewnętrzne wymiennika. Eksperymenty prowadzono na szerokim zakresie liczb Reynoldsa (Re = 100 – 15 000) wykorzystując wodę jako czynnik roboczy.

Wyniki pokazują, że spadek porowatości TPMS powoduje wyraźne zmniejszenie wartości krytycznej liczby Reynoldsa, a obserwowane wartości są niższe niż w konwencjonalnych kanałach. To zachowanie przypisuje się wtórnym przepływom wywołanym krzywizną, lokalnym niestabilnościom w warstwie ścinanej. Stwierdzono, że wartość krytycznej liczby Reynoldsa jest silnie zależna od porowatości TPMS.

The effect of directionality of macroscopic structure of contacting surfaces on thermal contact conductance of metallic joints

TOMASZ S. WIŚNIEWSKI

Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Cieplnej
ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa
e-mail: tomasz.wisniewski@pw.edu.pl

Keywords: Thermal contact conductance, directionality, metallic joint, surface macroscopic structure

The paper is devoted to experimental study of thermal contact conductance (TCC) of joints created by nominally flat metallic surfaces with directional macroscopic structure. The measurements were performed for pairs of samples made of mild steel and austenitic stainless steel in vacuum and in air. Apparent contact pressure at the interface was increased to 19 MPa. The contacting surfaces were machined with use of ball milling obtaining parallel grooves with a pitch from 0.15 to 0.7 mm and a depth from 1.7 to 16 μm. The samples were brought into contact at different angles between the grooves. The measurements showed that for small values of pitch and depth of grooves their parallel arrangement of grooves allowed to reach bigger TCC vs. perpendicular arrangement, particularly for bigger mechanical load and presence of air. Bigger size of the grooves resulted in lower TCC. The lowest values of TCC were obtained for 3° angle between grooves of both contacting surfaces. The results indicated the possibility of heat transfer control through change of arrangement of surfaces with certain directionality of their macroscopic structure.

ROZDZIAŁ 6
WPŁYW ZEWNĘTRZNYCH PÓL ELEKTRYCZNYCH, MAGNETYCZNYCH I ZLOŻONYCH GEOMETRII NA PROCESY CIEPLNO-PRZEPŁYWOWE

A statistical approach to EWOD analysis based on Recurrence Probability Analysis and *k-NN* Entropy

GABRIELA RAFAŁKO[1], *NORBERT MARWAN*[2]
ROMUALD MOSDORF[1], *PIOTR MROZEK*[3]

[1] Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny,
ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok
[2] A 62, Potsdam Institute for Climate Impact Research
Telegrafenberg A 31, 14473 Potsdam, Germany
[3] Bialystok University of Technology, Institute of Biomedical Engineering
Faculty of Mechanical Engineering
Wiejska 45A, 15-351, Bialystok
e-mail: gabriela.rafalko@pb.edu.pl

Keywords: the k-NN (Kozachenko–Leonenko) entropy method, EWOD, droplet dynamics, probability of recurrence

In Electrowetting on dielectric (EWOD) experiments a small droplet is actuated using electric field between electrodes. EWOD devices have found numerous practical applications, including point-of-care diagnostics, digital microfluidic platforms for biochemical assays, digital microfluidic cooling system [3,4,9], DNA and protein analysis and precise sample handling in lab-on-a-chip systems [7,10,15]. Such systems are often fabricated as DMF chips (digital microfluidics) with four main layers: the bottom layer, electrodes layer, dielectric layer, hydrophobic layer. Due to the micro- and nanoscale thicknesses of the top layers, together with the small dimensions of the electrodes and the microliter-sized water droplet, droplet motion under nominally identical experimental conditions exhibits a degree of stochasticity. Even minute variations in layer thickness and surface topography generate local wetting heterogeneities and contact-line pinning effects, leading to small but measurable differences in droplet actuation behaviour during successive electrode-to-electrode transitions. Consequently, the present work adopts a statistical approach to the analysis of droplet dynamics. While such an approach cannot completely eliminate the variability of individual experiments, it enables a systematic characterization of droplet motion.

Additionally, the multispectral and multimodal nature of the EWOD phenomenon [1,11,16] governed by coupled electrical, mechanical, interfacial and hydrodynamic processes results in highly nonlinear system dynamics. Therefore, conventional linear analysis techniques may not fully capture the underlying transition mechanisms, motivating the use of nonlinear signal analysis methods capable of revealing dynamical reorganizations, state transitions and precursor phenomena associated with droplet actuation.

In this paper, nonlinear analysis tools, including Kozachenko–Leonenko k-nearest-neighbor (*k-NN*) entropy estimation and recurrence probability analysis, are employed to characterize the dynamical evolution of EWOD-driven droplet motion and to identify state transitions embedded in the experimental signals.

Such an approach may enable to investigate EWOD plate durability via droplet dynamics analysis as the character of droplet actuation, its orderliness and dynamics corresponds to EWOD parameters and EWOD plate surface quality [5,12,14]. The research hypothesis is that the changes of Kozachenko–Leonenko k-nearest-neighbor (*k-NN*) entropy estimation and recurrence probability analysis may indicate the beginning and final phase of droplet actuation event thereby help to diagnose EWOD devices quality and performance during droplet actuation events.

Wymiana ciepła w sekcji konwekcyjnej reaktora fluidalnego

ARTUR BŁASZCZUK[1], SZYMON JAGODZIK[2]

[1] Politechnika Częstochowska, Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych
ul. Dąbrowskiego 71, 42-200 Częstochowa
[2] Tauron Wytwarzanie S.A., o/Elektrownia Łagisza
ul. Pokoju 14, 42-504 Będzin
e-mail: artur.blaszczuk@pcz.pl

Słowa kluczowe: przegrzewacze pary, ekonomizer, współczynnik przenikania ciepła, spaliny, czynnik roboczy

Przeprowadzono badania nad oceną intensywności wymiany ciepła w sekcji konwekcyjnej przemysłowego reaktora fluidalnego z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym (CFB). Analiza wymiany ciepła oparta była na danych pomiarowych z 4-ech rurowych wymienników ciepła (tj. przegrzewacz SH Ia, przegrzewacze RH Ia i RH Ib, ekonomizer ECO) o różnej geometrii układu rur. Przeprowadzono testy wydajności w szerokim zakresie obciążeń cieplnych reaktora fluidalnego z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym (od 40%Q do 100%Q), a także przy stosunku powietrza wtórnego do powietrza pierwotnego równym 0,11. Analiza przekazywania ciepła od gorących spalin do czynnika roboczego obejmowała: (i) konwekcyjną wymianę ciepła po stronie czynnika roboczego, (ii) konwekcyjną wymianę ciepła po stronie spalin oraz (iii) radiacyjną wymianę ciepła pod stronie spalin. Analiza procesu wymiany ciepła w rurowych wymiennikach ciepła umieszczonych w sekcji konwekcyjnej przemysłowego reaktora fluidalnego uwzględniała następujące współczynniki przejmowania ciepła: (i) konwekcyjny współczynnik przejmowania ciepła po stronie czynnika roboczego, (ii) konwekcyjny współczynnik przejmowania ciepła po stronie spalin omywających pęczki rur, (iii) radiacyjny współczynnik przejmowania ciepła po stronie spalin oraz (iv) radiacyjny współczynnik przejmowania ciepła od ścian sekcji konwekcyjnej do czynnika roboczego. Omówiono dane eksperymentalne jako funkcję obciążenia cieplnego reaktora, temperatury spalin, ciśnienia parcjalnego dwutlenku węgla i stężenia ziaren popiołu lotnego. Współczynnik przenikania ciepła wzrastał wraz ze wzrostem temperatury spalin dla wszystkich analizowanych rurowych wymienników ciepła. Ponadto wyniki dotyczące przenikania ciepła maleją wraz ze wzrostem ciśnienia parcjalnego dwutlenku węgla i spadkiem temperatury spalin dla wszystkich wymienników ciepła. Stwierdzono, że ciśnienie parcjalne dwutlenku węgla miało istotny wpływ na współczynnik przenikania ciepła. Zmiany temperatury spalin miały stosunkowo mniejszy wpływ na proces przenikanie ciepła. Współczynnik przenikania ciepła był wyższy, gdy stężenie popiołu lotnego w sekcji konwekcyjnej reaktora z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym było wyższe. Badania operacyjne przeprowadzone na przemysłowym reaktorze

z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym wykazały, że parametry termodynamiczne pary wodnej również wpływają na proces wymiany ciepła. Geometria powierzchni wymiany ciepła wpływa na intensywność wymiany ciepła w sekcji konwekcyjnej przemysłowego reaktora z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym. Ze względu na utylitarny charakter otrzymanych rezultatów, zależności między współczynnikiem przenikania ciepła a parametrami operacyjnymi reaktora fluidalnego zostały przedstawione przy użyciu analizy regresji. Wyniki dotyczące wymiany ciepła mogą być wykorzystane w projektowaniu, skalowaniu, eksploatacji przemysłowych reaktorów fluidalnych.

Mixed convection of paramagnetic fluid modified by a thermomagnetic force distribution with two extrema: a numerical study

LUKASZ PLESKACZ, ELZBIETA FORNALIK-WAJS

AGH University of Krakow Faculty of Energy and Fuels
Department of Fundamental Research in Energy Engineering
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow
e-mail: elzbieta.fornalik@agh.edu.pl

Keywords: thermomagnetic convection, Nusselt number, numerical analysis, non-dimensional analysis, magnetic Richardson number

In the light of rapidly increasing interest in space exploration, reduced gravity rearranged the energy balance, toward radiation and forced convection. The following research is devoted to the heat transfer intensification by magnetic field and generation of mixed convection phenomena without and with presence of gravity. The study covers the topic of the laminar flow of a paramagnetic fluid in a cylindrical geometry subjected to isothermal heating and a strong magnetic field. These two factors allow the formation of thermomagnetic force, which alters the flow structure and thermal performance of the system.

The geometry studied was a tube with fully developed laminar flow entering the channel. The magnetic field distribution was calculated on the basis of real superconducting magnet parameters. The inlet and outlet walls were considered adiabatic, with the isothermal heating assumed in between. The length of the heated section was directly dependent on the distribution of the magnetic induction gradient squared and indirectly on the thermomagnetic force. The heated area covered the first local extremum, magnetic center, and the second local extremum up to the place of negligible magnetic field influence.

The mathematical model was constructed through the non-dimensionalization of mass, momentum, and energy conservation equations. The additional thermomagnetic force term was included in the momentum conservation equation. The resulting equations set contained characteristic dimensionless quantities: Reynolds number, Péclet number, classical and magnetic Richardson numbers. The analyzes were conducted in Ansys Fluent enriched with numerous user-defined modules and performed for 162 cases including magnetic field influence and 21 comparative non-magnetic cases.

The two-element mixed convection analyzes considered the zero-gravity system with forced and thermomagnetic convection only. Adding gravitational buoyancy force resulted in a three-element mixed convection system. The unit gravitational acceleration vector was oriented streamwise or counter streamwise. The natural and thermomagnetic convection impact was regulated by classical and magnetic Richardson number values.

The results obtained showed a general heat transfer enhancement possibility in comparison to the non-magnetic cases. The functions correlating the average relative Nusselt number values with the Péclet and magnetic Richardson number values were presented in various forms. The applied gravitational buoyancy affected the scale of the thermal enhancement obtained. However, the specific analyzes performed for each case revealed areas of both relative increase and decrease in the local Nusselt number distributions.

Cieplno-przepływowe badania eksperymentalne mini strug syntetycznych

PAWEŁ GIL, RAFAŁ GAŁEK
Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
al. Powstańców Warszawy 8, 35-029 Rzeszów
e-mail: gilpawel@prz.edu.pl

Słowa kluczowe: mini struga syntetyczna, generator strugi syntetycznej, chłodzenie uderzeniowe, prędkości poddźwiękowe.

Generator strugi syntetycznej jest urządzeniem umożliwiającym wytwarzanie strugi o zerowym wydatku masowym netto w dyszy. Cechą charakterystyczną urządzenia wytwarzającego strugę syntetyczną jest brak zewnętrznego doprowadzenia płynu. Generator strugi syntetycznej składa się z drgającej membrany, komory oraz dyszy. Podczas cyklicznej pracy generatora strugi syntetycznej powstaje ciąg struktur wirowych, które przemieszczając się tworzą strugę syntetyczną. W pewnej odległości od dyszy te struktury wirowe załamują się tworząc przepływ turbulentny. Najbardziej perspektywicznym zastosowaniem strugi syntetycznej jest rozpraszanie ciepła, zarówno przy chłodzeniu uderzeniowym jak i w połączeniu z przepływami laminarnymi.

Badania nad strugami syntetycznymi są prowadzone od ponad 30 lat, zjawisko to jest dość gruntowanie przebadane pod kątem przepływowym i cieplnym, w szczególności dla dysz okrągłych. Najczęściej generatory strugi syntetycznej pracują przy wykorzystaniu powietrza jako płynu roboczego oraz mają dysze rozmiarów makro (średnica hydrauliczna jest rzędu kilkunastu milimetrów). Dla powietrznej strugi syntetycznej o liczbie Reynoldsa 5250 podczas chłodzenia uderzeniowego liczba Nusselta punktu stagnacji wynosi 50. Dla przykładowej średnicy 22 mm, współczynnik przejmowania ciepła wynosi wówczas 60 W/(m^{2}K). Jeżeli tego samego rzędu wartości liczby Nusselta byłyby możliwe do osiągnięcia również w przypadku mini strugi syntetycznej dla tej samej liczby Reynoldsa, np. o średnicy hydraulicznej dyszy równej 1 mm, skutkowałoby to wartościami współczynnika przejmowania ciepła ok. 1300 W/(m^{2}K). Tego rzędu wartości współczynnika przejmowania ciepła charakteryzują najwydajniejsze technologie chłodzenia dla powietrza jako płynu roboczego. Mimo obiecujących perspektyw technologia ta nie została dotąd gruntownie scharakteryzowana w dostępnej literaturze przedmiotu, nie ma informacji dotyczących budowy generatorów strugi syntetycznej dla zakresu średnic hydraulicznych rzędu milimetrów. W artykule zostanie zaprezentowany nowy rodzaj generatora strugi syntetycznej, umożliwiający generację wysokiego ciśnienia w komorze a tym samym wysokich prędkości z dysz o małej średnicy hydraulicznej od 0,55 mm do 2 mm. Zostaną zaprezentowane wstępne wyniki w postaci prędkości strugi syntetycznej

oraz profile promieniowe współczynników przejmowania ciepła przy chłodzeniu uderzeniowym. Ponadto zostaną opisane problemy technologiczne oraz problemy natury fizycznej tego typu generatorów.

ROZDZIAŁ 7
ZAGADNIENIA ZRÓWNOWAŻONEJ GOSPODARKI ENERGETYCZNEJ

Możliwości współdziałania elektrowni jądrowych z pogodozależnymi źródłami OZE, historia i perspektywy

KRZYSZTOF BADYDA

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Instytut Techniki Cieplnej
ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa
e-mail: pawel.jakonczuk@pb.edu.pl

Słowa kluczowe: pogodozależne odnawialne źródła energii (OZE), magazynowanie energii, zasobnik Ruths'a, energetyczne bloki jądrowe, nierynkowe redysponowanie energii ze źródeł OZE

Reaktory jądrowe stosowane w energetyce z różnych względów są predystynowane do pracy w warunkach stabilnego, najlepiej bliskiego pełnej wartości obciążenia. Z jednej strony są to względy ekonomiczne – droga inwestycyjnie elektrownia powinna generować wysokie, stabilne przychody. Zmiany obciążenia wiążą się z zagrożeniem zatruciem ksenonowym, w skrajnym wypadku, po zatrzymaniu reaktora może dojść do zablokowania możliwości jego uruchomienia przez kilkanaście godzin.

Mamy do czynienia z różnymi koncepcjami roli energetyki jądrowej w poszczególnych krajach. Przykładami są Niemcy, gdzie energetyka jądrowa została stopniowo wycofana, Francja, gdzie energetyka jądrowa odgrywa kluczową rolę – oraz Polska. Obecnie kładzie się nacisk na budowę w naszym kraju elektrowni jądrowych. Dzieje się to w kontekście intensywnego rozwoju niestabilnych źródeł odnawialnych (OZE). Już dziś obserwujemy okresy znaczących nadwyżek możliwości generacyjnych OZE. Towarzyszy temu rosnące ich ograniczenie (nierynkowe redysponowanie źródeł OZE, w nomenklaturze anglojęzycznej curtailment). Środkiem zaradczym może być budowa magazynów energii i wykorzystanie różnych technologii zarządzania nadwyżkami energii odnawialnej. Alternatywnym rozwiązaniem jest próba uelastycznienia pracy bloku jądrowego poprzez wkomponowanie w jego strukturę magazynu energii.

Przedstawione zostaną przykłady elektrowni jądrowych współpracujących z systemami magazynowania energii. Jednym z nich jest propozycja przygotowana i przeanalizowana przez autorów wystąpienia, która oparta jest na wykorzystaniu zasobnika Ruths'a. W omawianym przypadku dokonano oceny wykonalności integracji magazynów energii cieplnej opartych na akumulatorach parowych z obiegiem wtórnym elektrowni jądrowej w celu umożliwienia okresowej redukcji mocy bloku elektrowni jądrowej przy zachowaniu stabilnego obciążenia reaktora. Magazyn energii może być ładowany parą świeżą, odbieraną po części z wytwornicy. Skutkowałoby to zmniejszeniem jej poboru przez turbinę. W okresach malejącej podaży energii z OZE para ta byłaby odbierana z magazynu

i wykorzystywana do zasilania części NP turbiny. Szacowana sprawność cyklu ładowania i rozładowania dla przedstawionego rozwiązania okazuje się niższa niż w przypadku typowego magazynu energii opartego na bateriach litowych o porównywalnej pojemności, ale wyraźnie tańsza.

Wykorzystując jako studium przypadku awarię zasilania na Półwyspie Iberyjskim z kwietnia 2025 roku, w innej analizie wykazano, że tak zaproponowane rozwiązanie pozwala uniknąć wyłączenia i zatrucia ksenonem reaktora jądrowego poprzez przekierowanie do magazynu nadmiaru pary podczas awarii. Wyniki symulacji w tym przypadku wskazują, że połączony system TES-Elektrownia Jądrowa umożliwia elektrowni pozostanie w stanie gotowości do pracy i ponowne podłączenie do sieci już 80 minut po awarii – ponad 10 razy szybciej niż w rzeczywistym scenariuszu awarii. Więcej szczegółów zostanie podanych w kolejnych przykładach.

Prezentowany materiał stanowi wyniki prac zespołu w składzie: dr inż. Piotr Jóźwiak, inż. Hanna Sądej, dr hab. inż. Łukasz Szabłowski, inż. Łukasz Topolnicki oraz autor wystąpienia

Prace zrealizowano w ramach projektu zatytułowanego „Opracowanie dynamicznego modelu magazynu energii cieplnej zintegrowanego z elektrownią jądrową w celu przeanalizowania możliwości zmniejszenia zmienności obciążenia reaktora w odpowiedzi na fluktuacje zapotrzebowania na moc w systemie elektro-energetycznym" w ramach konkursu IDUB POSTDOC PW V.

Kierunki rozwoju energetycznego świata na tle zasobów energetycznych i rozwoju technologii konwersji energii

ROMAN DOMAŃSKI
Sieć Badawcza Łukasiwicz, Instytut Lotnictwa
Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa
e-mail: roman.domanski@ilot.lukasiewicz.gov.pl

Słowa kluczowe: energia pierwotna, zasoby energetyczne, paliwa kopalne, energia jądrowa, prognozy energetyczne

Dynamiczny rozwój cywilizacyjny, rosnące zapotrzebowanie na energię oraz konieczność ograniczenia negatywnego wpływu energetyki na środowisko naturalne powodują, że zagadnienia związane z długoterminowym rozwojem systemów energetycznych należą do kluczowych problemów współczesnego świata. W ostatnich latach obserwuje się intensywną debatę dotyczącą przyszłości globalnej energetyki, w której analizowane są zarówno dostępność zasobów energetycznych, jak i rozwój technologii ich przetwarzania oraz wykorzystania. Istotnym elementem tych rozważań są również uwarunkowania gospodarcze, demograficzne, środowiskowe oraz geopolityczne wpływające na kierunki transformacji energetycznej.

W referacie przedstawione zostaną podstawowe scenariusze rozwoju energetycznego świata opracowane przez wiodące międzynarodowe instytucje (IEA,WEC) i organizacje zajmujące się analizą sektora energetycznego zarówno rządowe jak i niezależne, a także przez największe światowe koncerny energetyczne (BP). Omówione zostaną między innymi scenariusze zakładające utrzymanie dominującej roli paliw kopalnych, scenariusze transformacji energetycznej prowadzącej do znacznego wzrostu udziału odnawialnych źródeł energii, jak również scenariusze zakładające rozwój energetyki niskoemisyjnej opartej na energetyce jądrowej oraz nowych technologiach konwersji energii. Przeprowadzone zostanie porównanie tych scenariuszy z uwzględnieniem przyjmowanych założeń dotyczących rozwoju gospodarczego, zmian demograficznych, postępu technologicznego oraz polityki klimatycznej.

Kolejnym elementem pracy będzie przedstawienie aktualnego stanu zasobów energetycznych świata, obejmujących zarówno zasoby paliw kopalnych – węgla, ropy naftowej oraz gazu ziemnego – jak i paliw jądrowych, przede wszystkim uranu oraz toru. Omówione zostaną zarówno zasoby udokumentowane, jak i zasoby prawdopodobne, a także ich rozmieszczenie geograficzne w skali globalnej, kontynentalnej oraz europejskiej. Szczególna uwaga zostanie poświęcona analizie wskaźników R/P (Reserves-to-Production), które określają przewidywany czas eksploatacji zasobów przy obecnym

poziomie wydobycia. Analiza ta pozwoli na ocenę długoterminowych perspektyw wykorzystania poszczególnych surowców energetycznych oraz ich znaczenia w globalnym bilansie energii pierwotnej.

W pracy przedstawiony zostanie również aktualny stan wykorzystania odnawialnych źródeł energii, takich jak energia słoneczna, wiatrowa, wodna, biomasa czy energia geotermalna, a także potencjalne możliwości dalszego zwiększania ich udziału w światowym miksie energetycznym. W tym kontekście omówione zostaną również ograniczenia technologiczne, ekonomiczne i środowiskowe związane z rozwojem energetyki odnawialnej, w tym problem zmienności produkcji energii oraz konieczność rozwoju systemów magazynowania energii.

Istotną część referatu stanowić będzie analiza uwarunkowań rozwoju energetycznego świata wynikających z czynników demograficznych, gospodarczych oraz politycznych. Rozważone zostaną różne warianty rozwoju populacji światowej, tempo wzrostu gospodarczego w różnych regionach świata, a także wpływ zdarzeń nadzwyczajnych, takich jak pandemie, konflikty polityczne czy kryzysy surowcowe. Czynniki te mają istotny wpływ na zapotrzebowanie na energię oraz kierunki rozwoju infrastruktury energetycznej.

W pracy przedstawione zostaną również charakterystyczne gęstości energii zmagazynowane w podstawowych paliwach kopalnych oraz paliwach jądrowych, co pozwoli na porównanie ich potencjału energetycznego z innymi nośnikami energii. Zaprezentowane zostaną również przykłady gęstości energii możliwej do akumulacji w różnych systemach magazynowania energii, takich jak baterie elektrochemiczne, magazyny sprężonego powietrza czy systemy magazynowania energii w postaci wodoru. W celu kompleksowej analizy efektywności energetycznej przedstawiona zostanie macierz sprawności konwersji energii obejmująca podstawowe technologie wytwarzania energii elektrycznej, cieplnej oraz mechanicznej.

Na podstawie przedstawionych rozważań omówione zostaną współczesne technologie konwersji energii, w tym technologie oparte na spalaniu paliw kopalnych, technologie jądrowe oraz systemy wykorzystujące odnawialne źródła energii. Szczególna uwaga zostanie poświęcona energetyce jądrowej, która w wielu scenariuszach transformacji energetycznej traktowana jest jako jedno z kluczowych źródeł stabilnej i niskoemisyjnej energii. W tym kontekście omówione zostaną nowe kierunki rozwoju technologii jądrowych, w tym reaktory powielające, małe modularne reaktory jądrowe (SMR – Small Modular Reactors) oraz mikroreaktory jądrowe przeznaczone do zasilania odległych regionów lub specjalistycznych instalacji przemysłowych.

Osobne zagadnienie stanowić będzie rozwój technologii magazynowania energii, które odgrywają coraz większą rolę w stabilizacji pracy systemów energetycznych, szczególnie w warunkach rosnącego udziału niestabilnych źródeł odnawialnych. Przedstawione zostaną główne kierunki rozwoju tych technologii oraz ich znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego i stabilności systemów elektroenergetycznych.

W referacie zaprezentowane zostanie również aktualne spojrzenie na rozwój technologii przyszłościowych, takich jak kontrolowana synteza termojądrowa oraz wykorzystanie wodoru jako uniwersalnego nośnika energii w systemach energetycznych i transportowych.

Rozważone zostaną także koncepcje wysp energetycznych oraz systemów energetyki rozproszonej, które mogą odgrywać coraz większą rolę w zapewnianiu lokalnego bezpieczeństwa energetycznego.

W podsumowaniu przedstawione zostaną wnioski dotyczące przyszłych kierunków rozwoju globalnej energetyki oraz ich znaczenia dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego na różnych poziomach – od skali globalnej, poprzez poziom kontynentalny, aż do poziomu państw i regionów. Przeprowadzona analiza pozwoli na wskazanie najważniejszych wyzwań oraz potencjalnych kierunków rozwoju technologii energetycznych w perspektywie najbliższych dekad.

W podsumowaniu zostaną przedstawione wnioski dotyczące bezpieczeństwa energetycznego na różnym poziomie Świata, kontynentu, państwa.

Innowacyjne wykorzystanie odpadów rybnych do produkcji biomasy mikroalgowej przeznaczonej na substrat biogazowy

MAŁGORZATA SMUGA-KOGUT[1], TOMASZ PISKIER[1]
DARIA SZYMANOWSKA[2], MAŁGORZATA HAWROT-PAW[3]
MARCIN KRUZEL[1], KRZYSZTOF DUTKOWSKI[1]

[1] Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
ul. Racławicka 15-17, 75-620 Koszalin
[2] Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Biotechnologii i Mikrobiologii Żywności
Wojska Polskiego 48, 60-627 Poznan
[3] Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa
Pawla VI 1, 71-459 Szczecin
e-mail: malgorzata.smuga-kogut@tu.koszalin.pl

Słowa kluczowe: zagospodarowanie odpadów, odpady rybne, mikroalgi, biogaz

Dynamiczny rozwój biogospodarki wymaga poszukiwania innowacyjnych rozwiązań w zakresie zagospodarowania odpadów przemysłowych. Jednym z obiecujących kierunków jest wykorzystanie odpadów rybnych, bogatych w białko i tłuszcze, jako źródła składników odżywczych dla mikroalg. Mikroalgi z rodzaju Arthrospira platensis cechują się wysoką zawartością białka, zdolnością akumulacji biogenów oraz potencjałem do wykorzystania w procesach energetycznych, m.in. jako substrat biogazowy. Celem badań była ocena możliwości zastosowania płynnych odpadów z przetwórstwa ryb (pstrąg, śledź, łosoś) jako alternatywnego medium hodowlanego dla A. platensis.

Eksperyment przeprowadzono w skali laboratoryjnej, w pięciu reaktorach pionowych o pojemności 5 L każdy. Medium standardowe (Spirulina medium) zastępowano roztworem odpadu rybnego w stężeniach: 0%, 25%, 50%, 75% i 100%. Hodowle prowadzono przez 7 dni w temperaturze 22°C, w cyklu świetlnym 16/8 h. Codziennie monitorowano gęstość optyczną, a po zakończeniu procesu biomasa została odwirowana i poddana analizie suchej masy, zawartości chlorofilu, węgla, azotu, fosforu.

Największy przyrost biomasy stwierdzono w wariancie z 75% dodatkiem odpadu rybnego, co wskazuje na optymalne zbilansowanie składników odżywczych. Biomasa z tego wariantu charakteryzowała się podwyższoną zawartością suchej masy, chlorofilu oraz większym udziałem biogenów w porównaniu do próby kontrolnej. Zbyt wysokie stężenie odpadu (100%) ograniczało wzrost, prawdopodobnie ze względu na nadmiar substancji organicznych i obecność koagulantów.

Uzyskane wyniki potwierdzają potencjał innowacyjnego wykorzystania odpadów rybnych w hodowli mikroalg. Zastosowanie tej technologii może znacząco obniżyć koszty produkcji biomasy algowej, jednocześnie stanowiąc efektywną metodę zagospodarowania odpadów przemysłowych w duchu gospodarki o obiegu zamkniętym. Transfer uzyskanych rezultatów do praktyki gospodarczej otwiera nowe możliwości dla sektora akwakultury i przemysłu energetycznego, łącząc produkcję biomasy mikroalgowej z wytwarzaniem odnawialnych źródeł energii.

Ujemna emisja CO_2 poprzez wytwarzanie biowęgla

RAFAŁ KOBYŁECKI, ROBERT ZARZYCKI
Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska
ul. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa
e-mail: rafal.kobylecki@pcz.pl, robert.zarzycki@pcz.pl

Słowa kluczowe: biomasa, biowęgiel, CO_2

W artykule przedstawiono podstawowe wymogi prawne, polityczne oraz środowiskowe związane z koniecznością przeciwdziałania zmianom klimatycznym oraz ograniczenia tempa zużywania paliw kopalnych. Mimo rozwijanych wielu technologii w tym zakresie realną perspektywą oferującą – w skali przemysłowej – możliwości praktycznego ograniczenia nadmiarowej emisji ditlenku węgla jest termoliza biomasy i jej konwersja do postaci biowęgla. W pracy przedstawiono i omówiono wyniki badań autorów w tym zakresie wraz oceną realnego sposobu na osiąganie ujemnej emisji ditlenku węgla. Przedstawione wyniki obejmują zarówno aspekt teoretyczny, jak i praktyczny o czy świadczą kilkunastoletnie wyniki prac autorów.

Experimental and numerical investigation of hydrogen combustion in oxygen-steam mixtures

ADAM KLIMANEK, SŁAWOMIR SŁADEK, JAKUB TUMIDAJSKI
AGNIESZKA CIESIELSKA, MICHAŁ CHABIŃSKI, ANDRZEJ SZLĘK

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Techniki Cieplnej
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
e-mail: adam.klimanek@polsl.pl

Keywords: hydrogen, combustion, MILD combustion, oxycombustion, CFD

In this study numerical and experimental investigation of non-premixed combustion of hydrogen in oxygen-steam mixtures have been conducted. The aim of this work was to verify the possibility of generating steam by combustion of hydrogen in oxygen, utilizing the Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution (MILD) combustion technique. This approach allows to obtain more uniform temperature distribution and close to equilibrium products composition, leading to lower unburned hydrogen content in the flue gas. The MILD conditions were obtained by dilution of the oxygen with steam and preheating the oxidizer above the ignition temperature. Furthermore internal recirculation of the gases in the combustion chamber was induced aerodynamically. Therefore the experiments were conducted for various steam mass flow rates, chemical energy flows (power) of the fuel, excess oxidizer ratios λ and oxygen dilutions in the oxidizer stream. The goal was to investigate the temperature distribution in the combustion chamber and the amount of unreacted or dissociated oxygen at the combustor outlet. The unreacted or dissociated oxygen at the combustor outlet was determined as the difference between measured and theoretical oxygen in the flue gas for complete combustion. It was found that the most uniform temperature distributions were obtained for smallest excess air ratios of 1, and for all studied chemical energy inputs. Similarly the highest outlet temperatures were obtained for λ close to unity. Overall, as could be expected, higher temperatures were observed for the highest chemical energy inputs, due to smaller contribution of heat losses for the high power cases. The amount of unreacted or dissociated oxygen was generally increasing with increasing λ, and fell in the range between 0 and 1.7%, which suggest that the amount of unreacted hydrogen (not measured) should not exceed 3.4% and conditions with outlet H2 smaller than 1% by vol. can be easily found. Although MILD combustion conditions were assured in all studied cases (inlet temperature exceeding the ignition temperature, high dilution of O2 in the oxidizer and internal recirculation of products), depending on the excess air ratio, the temperatures in different regions of the combustion chamber could be different. This means that the reaction zones could be more localized (for high excess air ratios) or distributed (for λ close

to unity). The combustion process was simulated using CFD (ANSYS Fluent) applying both, RANS and LES approaches. In both cases detailed chemical mechanism was applied. In the RANS approach the k-ω SST turbulence model was used, and the Eddy Dissipation Concept model was applied to account for the turbulence-chemistry interaction. The modeling was used both at the stage of designing of the combustion system and for verifying computations. The results confirmed most of the findings observed in the experiments and gave insight into the process, although the model based on the LES approach required several months of calculations, which makes its use difficult.

Industrial Utilization of Low-Temperature Waste Heat: Practical Implementations of ORC Systems and Ejector Refrigeration Cycles Using R1233zd(E)

MIKOŁAJ MASTROWSKI, PIOTR KLONOWICZ[1], ŁUKASZ ANTCZAK[1]

[1] MARANI Sp. z o.o., Reserach, Development and Implementation Department
ul. Szybowa 14c, 41-808 Zabrze
e-mail: mastrowski@marani.pl

The practical implementation of an Organic Rankine Cycle system and a single-phase ejector refrigeration cycle employing the low-GWP refrigerant R1233zd(E) is investigated. Experimental case studies of both systems are presented and analysed to assess their performance under real operating conditions. The investigated waste heat recovery concepts include an ORC system for electricity generation utilizing waste heat recovered from the lubrication oil circuit of an air compressor, and a thermally driven ejector refrigeration system for cooling applications. Both systems are designed to recover and utilize low-temperature waste heat sources below 100°C, demonstrating their potential to improve energy efficiency and enhance the utilization of industrial waste heat.

ROZDZIAŁ 8
BADANIA EKSPERYMENTALNE I DIAGNOSTYKA PROCESÓW CIEPLNO-PRZEPŁYWOWYCH

Badania eksperymentalne ustalonego stanu pracy dla silnika satelitarnego typu resistojet

JAN KINDRACKI, KAROL SZCZEGÓLSKI
Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Instytut Techniki Cieplnej
ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa
e-mail: jan.kindracki@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: silnik resitojet, silniki satelitarne, warunki ustalone, grzałka nawojowa, stała czasowa

Obserwowany w ostatnich latach wzrost zainteresowania wykorzystaniem przestrzeni kosmicznej jest związany z masowym wejściem prywatnych podmiotów na ten rynek. Przyczyniło się to zwiększenia dostępności technologii kosmicznych a co za tym idzie zmniejszenia kosztów wyniesienia urządzeń w przestrzeń kosmiczną. Zwiększona konkurencja na rynku oraz postępująca miniaturyzacja urządzeń wymaga dostarczania nowych, bardziej efektywnych konstrukcji, co powoduje, że dotychczas niszowe rozwiązania technologiczne zyskują na atrakcyjności. Jedną z takich technologii, są elektryczne napędy rakietowe, które kilkadziesiąt lat temu stanowiły raczej swoistą ciekawostkę a dziś wbudowywane są w pojazdy kosmiczne i mogą stanowić o przewadze konkurencyjnej danego podmiotu rynkowego budującego dany pojazd. Wykorzystanie energii elektrycznej, w silniku rakietowym pozwala na znaczące zmniejszenie zapotrzebowania na czynnik roboczy a tym zmniejsza masę satelity i koszty jego wystrzelenia.

W przestrzeni kosmicznej, satelity wykorzystują napędy rakietowe do zmiany orbity czy wykonywania korekt pozycji. Jednym z prostszych w konstrukcji napędów elektrycznych, jest silnik resistojet, który poprzez wykorzystanie elektrycznej grzałki oporowej zwiększa energię czynnika roboczego. Od jego budowy, masy i rodzaju wykorzystanych materiałów zależy bezładność termiczna a to wpływa na wartość generowanego ciągu i efektywność. W czasie pracy ustalonej, zależność pomiędzy parametrami wejściowymi a generowanym ciągiem jest liniowa i układ sterowania może w łatwy sposób wyznaczyć niezbędny czas pracy dla wykonania planowanego manewru. Jednakże znaczna część korekt i manewrów, odbywa się w okresie pracy nieustalonej. Dlatego, niezbędne jest wyznaczenie relacji parametrów w tym okresie. Niniejsza praca opisuje badania eksperymentalne dla silnika resistojet wyposażonego w dwie grzałki oporowe, połączone szeregowo, które podgrzewają czynnik roboczy jakim jest powietrze dostarczone ze zbiornika pod określonym ciśnieniem.

Przeprowadzone badania, pozwoliły na określenie równania i stałej czasowej τ dla osiągnięcia stanu ustalonego w funkcji mocy grzałki (napięcie zasilania 25÷35 V) i strategii jej uruchamiania względem przepływu czynnika roboczego. Dla tak określonej

zależności wyznaczono błędy pomiędzy przewidywaniem a wartościami z eksperymentów. Lepsza predykcja temperatury czynnika roboczego, pozwala na dokładniejsze wyznaczanie parametrów napędowych silnika i określenie niezbędnego czasu pracy do wykonania danego manewru w przestrzeni kosmicznej.

Badania eksperymentalne wpływu temperatury początkowej na liniową prędkość spalania ziarna, rakietowego materiału pędnego opartego na lepiszczu – poli(azydku glicydylu)

JAN KINDRACKI[1], KRZYSZTOF WACKO[1], MICHAŁ CHMIELAREK[2]
SYLWIA METELSKA[1], ŁUKASZ MĘŻYK[1], PRZEMYSŁAW WOZNIAK[1]
MACIEJ KOŁODZIEJ[1], TOMASZ GOŁOFIT[2]
KATARZYNA CIEŚLAK[2], PAWEŁ MAKSIMOWSKI[2]

[1] Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Instytut Techniki Cieplnej
ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa
[2] Politechnika Warszawska, Wydział Chemiczny
Zakład Materiałów Wysokoenergetycznych
ul. Noakowskiego 3, 00-664 Warszawa
e-mail: jan.kindracki@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: silnik rakietowy, stały materiał pędny, poli(azydek glicydylu) GAP, liniowa szybkość spalania, temperatura początkowa ziarna

Gwałtowny rozwój technologii kosmicznych i konieczność wynoszenia ich w przestrzeń kosmiczną, a także niestety duża i niemalejąca rola pocisków rakietowych na arenach współczesnych konfliktów zbrojnych napędza rozwój silników rakietowych różnego typu. Jednym z takich napędów jest silnik na stały materiał pędny, znajdujący zastosowania cywilne, ale w głównej mierze używany w zastosowaniach militarnych. W tym obszarze jednymi z kluczowych wymagań są bardzo krótki czas przygotowań przedstartowych, długi czas życia i możliwość działania w skrajnie różnych warunkach temperaturowych. Badania nad nimi skupiają się obecnie na poszukiwaniu nowych komponentów i składów pozwalających na generowanie wysokich impulsów właściwych, niegenerowanie szkodliwych składników spalin – głównie związków chloru ze względu na ich wysoką aktywność korozyjną na elementach wyrzutni oraz zmniejszenie intensywności dymienia.

W klasycznych heterogenicznych materiałach pędnych jako polimerowe lepiszcze (paliwo) stosowany jest HTPB (polibutadien zakończony grupami hydroksylowymi). Nową propozycją jest wykorzystanie poli(azydku glicydylu),w skrócie GAP, który pełni rolę dodatku energetycznego. Stosując go można projektować materiały pędne o zmniejszonej sygnaturze dymienia. Dodatkowo jego zwiększona gęstość względem HTPB pozwala na uzyskanie materiałów pędnych o zwiększonej gęstości względem tych opartych na HTPB.

Opisywane badania skupiają się na dwóch kompozycjach opartych na GAP. Jedna z nich przeznaczona jest do małych silników sterujących, a druga do silników marszowych. Znajomość liniowej szybkości spalania jest niezmiennie istotna do tego, aby móc prawidłowo zaprojektować silnik. Zależność ta jest funkcją potęgową pomiędzy ciśnieniem panującym w komorze spalania a wspomnianą wartością i może ulegać znaczącym zmianom wraz ze zmianą temperatury początkowej ziarna, co ma miejsce podczas typowej eksploatacji silnika w pocisku rakietowym. Badania eksperymentalne przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym i opatentowanym stanowisku badawczym dla standardowego zakresu temperatur –40 ÷ +50°C i różnych ciśnień pracy. Zmienność ciśnienia w komorze osiągano poprzez zmianę dyszy wylotowej mikrosilnika badawczego. Uzyskane wyniki pozwalają na wyznaczenie funkcji szybkości spalania i ciśnienia dla różnych temperatur początkowych. Zdefiniowana zależność stanowi niezbędny krok do zaprojektowania komory spalania umożliwiającej bezpieczną eksploatację sinika.

Thermodynamic analysis of frictional heat generation in multi-vane machinery

SZYMON LECH, PIOTR KOLASIŃSKI, DAWID SOWA
Politechnika Wrocławska Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
e-mail: szymon.lech@pwr.edu.pl

Keywords: frictional heat generation; rotary vane expander; mechanical losses; energy efficiency

Multi-vane machines are gaining popularity in energy conversion systems due to their compact design, relatively simple construction, and favourable operating characteristics. Despite these advantages, their efficiency and durability are significantly constrained by mechanical losses, among which friction occurring between the working components of the machine plays an important role.

Mechanical losses resulting from friction are widely acknowledged as a significant factor affecting the efficiency and durability of multi-vane machines. However, the process of frictional heat generation itself, understood as a physical phenomenon taking place in the contact zones of moving parts, remains poorly recognised and is rarely addressed as a distinct subject of analysis in the literature. This is particularly evident in the case of multi-vane machines, where frictional heat generation is most often treated implicitly as part of general mechanical losses rather than being explicitly identified and thermodynamically characterised.

In response to this research gap, the present study addresses modelling and experimental investigations aimed at the quantitative analysis of frictional heat generation in a multi-vane machine operating under steady-state conditions. To this end, a dedicated experimental test bench was designed and constructed, enabling the measurement of key operating parameters such as machine torque, rotational speed, pressure, and temperature at selected locations within the system, as well as the heat flux density on the surface of the multi-vane machine. In parallel, work has been initiated on the development of a mathematical energy balance model, which provides the basis for separating thermal effects directly associated with friction from other irreversible mechanisms.

The approach presented constitutes a preliminary investigation, the outcomes of which will guide further experimental and modelling efforts. The ultimate objective of this ongoing research is to achieve a more comprehensive understanding of frictional heat generation as a distinct physical process in multi-vane machines.

Metoda obliczeniowa i jej eksperymentalna weryfikacja – Wychwyt CO_2 przez adsorpcję zmiennotemperaturową przy ruchomym złożu

ADAM PAWŁOWSKI, ARTUR CEBULA
Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: adam.pawlowski@pk.edu.pl, artur.cebula@pk.edu.pl

Słowa kluczowe: gPROMS, stanowisko badawcze, wychwyt CO_2, adsorpcja zmiennotemperaturowa, złoże ruchome

Artykuł przedstawia instalację badawczą przeznaczoną do wychwytywania CO_2 ze spalin powstających podczas spalania pyłu węglowego. Jej działanie opiera się na procesie adsorpcji zmiennotemperaturowej w złożu ruchomym, w którym jako adsorbent zastosowano węgiel aktywny. Uzyskane rezultaty porównano z wynikami symulacji, które przeprowadzono przy użyciu oprogramowania gPROMS Process. Symulacje wskazują, że energia potrzebna do regeneracji adsorbentu wynosi około 5,7 MJ/kg CO_2, natomiast w trakcie badań eksperymentalnych odnotowano wartości z przedziału 12–75 MJ/kg CO_2. Tak duże różnice wynikają z testowania różnych strumieni masowych podawanego sorbentu. Dla optymalnych warunków pracy energochłonność regeneracji węgla aktywnego wynosiła około 25 MJ/kg CO_2. Różnica między wynikami eksperymentalnymi, a obliczeniowymi wynika przede wszystkim z postępującej degradacji węgla aktywnego w trakcie pracy instalacji oraz braku idealnej szczelności systemu transportowego.

Instalacja do wychwytu CO_2 została zlokalizowana w jednej z hal elektrociepłowni, co wymagało uwzględnienia istniejących ograniczeń konstrukcyjnych obiektu. W szczególności konieczne było dostosowanie projektu stanowiska badawczego do dopuszczalnych obciążeń stropu oraz dostępnej wysokości kondygnacji. Ograniczenia te miały istotny wpływ na sposób rozmieszczenia aparatury oraz dobór poszczególnych elementów instalacji, tak aby zapewnić bezpieczną eksploatację urządzenia. Stanowisko badawcze składa się z trzech kolumn procesowych odpowiadających poszczególnym sekcjom instalacji. Zostały one rozmieszczone w układzie trójkątnym, w którym każda z kolumn znajdowała się w jednym z wierzchołków figury. Poszczególne wierzchołki trójkąta połączono przenośnikami taśmowymi, które stanowiły boki tej geometrycznej konfiguracji. Przenośniki te odpowiadały za transport węgla aktywnego pomiędzy kolejnymi etapami procesu, zapewniając jego ciągły obieg pomiędzy sekcjami instalacji.

Głównym wnioskiem z przeprowadzonych badań jest stwierdzenie, że węgiel aktywny nie jest obecnie odpowiednim adsorbentem do długotrwałej eksploatacji w procesie MBTSA. W trakcie pracy instalacji można zaobserwować stopniową degradacje jego

właściwości sorpcyjnych, co prowadzi do spadku efektywności wychwytywania CO_2 oraz do znacznego wzrostu zapotrzebowania na energię w procesie regeneracji adsorbentu. Przedstawione rezultaty mogą stanowić podstawę do dalszych badań nad bardziej trwałymi i efektywnymi adsorbentami oraz nad optymalizacją parametrów pracy instalacji do wychwytywania CO_2 ze spalin.

Analiza termodynamiczna i wstępne pomiary silnika spalinowego sześciosuwowego

IRENEUSZ SZCZYGIEŁ, GRZEGORZ PRZYBYŁA
Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
e-mail: ireneusz.szczygiel@polsl.pl

Słowa kluczowe: silnik ZI, analiza termodynamiczna, obiegi termodynamiczne, silnik dupaliwowy

Artykuł przedstawia analizę eksperymentalną oraz symulację termodynamiczną innowacyjnego silnika spalinowego o cyklu sześciosuwowym zasilanego mieszaniną wodoru i metanu. Celem pracy była ocena możliwości zwiększenia sprawności energetycznej silników o zapłonie iskrowym oraz ograniczenia emisji zanieczyszczeń poprzez zastosowanie zaawansowanego cyklu pracy i paliw o obniżonej emisyjności. Badania wpisują się w kontekst transformacji energetycznej oraz poszukiwania rozwiązań redukujących emisję gazów cieplarnianych w sektorze transportu i przemysłu.

W pierwszym etapie badań przeprowadzono eksperymenty na jednocylindrowym silniku czterosuwowym zasilanym mieszaniną zawierającą 60% objętościowo wodoru i 40% metanu. Silnik pracował przy stałej prędkości 1500 obr./min, przy współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1{,}3$. Analizowano wpływ kąta wyprzedzenia zapłonu na parametry pracy oraz emisję silnika. Najwyższą sprawność indykowaną, wynoszącą około 37,4%, uzyskano przy wyprzedzeniu zapłonu równym 19° przed górnym martwym położeniem tłoka. Zaobserwowano wzrost emisji NO wraz ze zwiększaniem wyprzedzenia zapłonu oraz niewielkie zmniejszenie emisji CO_2.

W drugim etapie przeprowadzono analizę termodynamiczną obiegu porównawczego silnika w cyklu sześciosuwowym. W proponowanej koncepcji po klasycznym czterosuwowym cyklu spalania, z uwagi na fakt, iż spalana jest mieszanka uboga, w cylindrze pozostają spaliny zawierające tlen. W końcowej fazie rozprężania następuje wtrysk wody, który obniża temperaturę gazów roboczych. Następnie do cylindra wprowadzana jest dodatkowa dawka wodoru, tworząca z pozostałym tlenem mieszaninę stechiometryczną. Jej zapłon prowadzi do dodatkowego suwu pracy, umożliwiającego odzysk części energii cieplnej spalin.

Wyniki obliczeń wykazały, że zastosowanie cyklu sześciosuwowego może zwiększyć sprawność energetyczną silnika o około 8–18 punktów procentowych w stosunku do klasycznego cyklu czterosuwowego. Kluczowym czynnikiem wpływającym na sprawność jest ilość wtryskiwanej wody oraz moment jej podania. Najlepsze rezultaty uzyskano dla udziału wody wynoszącego około 30% masy gazów roboczych w cylindrze. Wtrysk

wody powoduje obniżenie temperatury i ciśnienia w cylindrze, co umożliwia bardziej efektywne spalanie dodatkowej dawki wodoru oraz potencjalne ograniczenie emisji związków azotu.

Uzyskane wyniki wskazują, że połączenie cyklu sześciosuwowego z paliwami zawierającymi wodór może stanowić perspektywiczne rozwiązanie dla poprawy sprawności silników spalinowych przy jednoczesnej redukcji emisji zanieczyszczeń, szczególnie w sektorach, w których pełna elektryfikacja jest utrudniona.

ROZDZIAŁ 9
WYMIANA CIEPŁA I MASY – WRZENIE, KONDENSACJA, PRZEPŁYWY DWUFAZOWE I MINIKANAŁY

Problem „dry spot" przy odparowaniu koncentratu soku na rurach pionowych

ADAM SOBIK[1]*, PIOTR CYKLIS*[2]

[1] Politechnika Krakowska Studium Doktoranckie
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
[2] Politechnika Krakowska
Wydział Mechaniczny Katedra Inżynierii Cieplnej i Procesowej
al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków
e-mail: adam.sobik@doktorant.edu.pk.pl, piotr.cyklis@pk.edu.pl

Słowa kluczowe: odparowanie koncentratu, dry spot, wyparka pionowa

W pionowych wyparkach różnych zastosowań od koncentratów soku po odsalanie wody morskiej wymiary rur opadowych, czyli ich średnica i długość dobierane są wykorzystując tzw. „dobre praktyki inżynierskie". W przypadku wyparek do koncentratów owocowych ważna jest ostateczna czystość soku podawane w NTU. Na tą wielkość ma wpływ powstawanie suchych miejsc na powierzchni wewnętrznej rury, gdzie następuje przypalenie lub przesuszenie cieczy. Na początku rury opadowej zalewany jest cały przekrój, ale jak pojawia się para to mamy do czynienia z przepływem przyściennym współprądowym dwufazowym. Prawidłowe zamodelowanie takiego przepływu umożliwi określenie właściwej proporcji długości/średnicy rurek dla określonego napływu moszczu, bez zagrożenia powstawania przesuszeń. Wymaga to zamodelowania całej długości rury przy zmieniających się własnościach cieczy opadającej i pary wodnej w środku. Własności cieczy zmieniają się, bo odparowaniu ulega jedynie H_2O a głównym składnikiem stałym soku jest rozpuszczony cukier, którego zawartość zmienia się od ok 10 do 70 Brix w całej wyparce i jest to dzielone na stopnie. Określenie granicznych wartości przepływu dla rurek pozwoli też na odpowiednie włączenie recyrkulacji. Narzędziem symulacji CFD jest FLUENT.

Przeprowadzone badania sprawdzają zgodność wzoru Hartleya opisującego minimalne natężenie przepływu cieczy na jednostkę obwodu (Γmin), poniżej którego film cieczy staje się niestabilny i może ulec zerwaniu, tworząc suche plamy. Wzór ten nie uwzględnia wpływu ruchu pary odparowanej z soku co jest głównym obiektem badań. Przyjęta metodologia obejmuje zamodelowanie stałej geometrii rury i sterowanie wartością strumienia masowego soku na wlocie w celu sprawdzenia zgodności wzoru z symulacją. Podczas zastosowania strumienia masowego soku na wlocie większego od występującego w rzeczywistym urządzeniu zbadano stabilność numeryczną symulacji oraz prawidłowość działania modelu na podstawie sprawdzenia bilansu mas, śledzenia ilości odparowanej pary, pokrycia powierzchni wewnętrznej sokiem, oraz grubości filmu. Po obniżeniu wartości przepływu wykazano tworzenie suchych plam na powierzchni rury. Do symulacji wykorzystano wycinek rury o kącie 60 stopni, o długości 50 cm, aby skrócić czas

obliczeń względem pełnej rury. Z racji na charakter badanego zjawiska symulacja jest analizowana w trybie Transient, co przy siatce wielkości dwóch milionów elementów jest problematyczne względem czasu obliczeń. Symulacja sekundy przepływu soku zajmuje około 30h. Na podstawie liczb kryterialnych ustalono, że charakter przepływu na trzecim stopniu wyparki jest laminarny, co pozwoliło na użycie modelu Viscous: Laminar w Fluent co z kolei przyspiesza czas obliczeń względem modeli turbulentnych. Użyto także modelu Multiphase VOF oraz Energy w celu uwzględnienia parowania.

Przejmowanie ciepła w quasi-idealnym płaszczowo-rurowym wymienniku ciepła z przegrodami segmentowymi

JANUSZ T. CIEŚLIŃSKI, PAWEŁ DĄBROWSKI
KAMIL STASIAK, KRZYSZTOF TESCH
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: jcieslin@pg.edu.pl

Słowa kluczowe: wymiennik płaszczowo-rurowy, przegrody segmentowe, przejmowanie ciepła w płaszczu, metody analityczne i numeryczne

Wymienniki ciepła płaszczowo-rurowe (STHEx) są najczęściej stosowanymi urządzeniami do przekazywania energii cieplnej w wielu dziedzinach techniki. Wynika to z możliwości stosowania tego typu wymienników w bardzo szerokim zakresie ciśnień i temperatur. Stąd od niemal stu lat prowadzone są prace nad rozwojem metod obliczania zarówno współczynników przenikania ciepła, jak i spadków ciśnienia. Dokładniejsze metody obliczeniowe mają kluczowe znaczenie ze względu na oszczędność energii i materiałów używanych do budowy wymienników ciepła, a także na koszty ich eksploatacji.

We współczesnych STHEx standardowym rozwiązaniem jest stosowanie przegród, których zadaniem jest intensyfikacja wymiany ciepła przez zwiększenie turbulencji przepływu i eliminację stref martwych, a także podparcie rur, np. w celu uniknięcia szkodliwych drgań. Jednak stosowanie przegród wiąże się ze wzrostem oporów przepływu, a w konsekwencji ze wzrostem mocy pompowania. Dlatego konieczne są metody pozwalające na precyzyjne wyznaczanie zarówno współczynników przejmowania ciepła, jak i oporów przepływu.

Współczesne metody obliczania współczynników przejmowania ciepła w STHEx opierają się na modelu Tinkera, który zaproponował podział przepływu po stronie płaszcza na: strumień poprzeczny do pęku rurek, strumień przeciekowy wynikający z luzów pomiędzy otworem w przegrodzie a rurkami, strumień opływający pęk rur w przestrzeni pomiędzy pękiem rurek a płaszczem oraz strumień przeciekowy wynikający z luzów pomiędzy przegrodą a płaszczem.

W idealnym STHEx nie ma przecieków płynu pomiędzy przegrodą a rurkami, przecieków między przegrodą a płaszczem, a pęk rurek wypełnia cały płaszcz. W quasi-idealnym STHEx zakłada się brak przecieków płynu pomiędzy przegrodą a rurkami i przecieków między przegrodą a płaszczem. Występuje natomiast przestrzeń pomiędzy pękiem rurek a płaszczem, przez którą część płynu omija pęk rurek, a więc nie bierze udziału w przenoszeniu ciepła.

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła po stronie płaszcza dla quasi-idealnego STHEx o średnicy wewnętrznej płaszcza 200 mm i długości czynnej rurek 518 mm. Liczba miedzianych rurek (12/10 mm), w układzie przestawionym, o podziałce 1.5 wynosiła 85. Liczba przegród segmentowych o strzałce wycięcia 25% wynosiła 9, przy odstępie 48 mm. Średnia temperatura wody gorącej płynącej w płaszczu wynosiła 69°C, a strumień masy zmieniał się w zakresie 1–6 kg/s. W szczególności testowano wpływ średnicy obwiedni pęku rurek oraz taśm uszczelniających na średni współczynnik przejmowania ciepła. W obliczeniach zastosowano rozszerzoną metodę Bell-Delaware oraz metodę VDI (Gaddisa–Gnielinskiego). Otrzymane wyniki porównano z obliczeniami wykonanymi w programie Aspen EDR oraz z modelowaniem CFD przeprowadzonym przy użyciu procedury OpenFOAM.

Badania eksperymentalne wydajności cieplnej i hydrodynamicznej wymiennika ciepła z minikanałami

MARIA TYCHANICZ-KWIECIEŃ, JOANNA WILK
Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
ul. Powstańców Warszawy 12, 35-029 Rzeszów
e-mail: mtychanicz@prz.edu.pl

Słowa kluczowe: minikanały, wydajność cieplna, wydajność hydrodynamiczna, badania eksperymentalne

Wydajność wymiennika ciepła odnosi się do wielu aspektów, w tym do wymiany ciepła, oporów przepływu, wydajności mechanicznej, ekonomicznej i wielu innych. Wydajność hydrodynamiczna jest określona jako stosunek całkowitej mocy cieplnej wymiennika ciepła do sumarycznej mocy pompowania. Z kolei wydajność cieplna informuje o stosunku efektywności cieplnej do całkowitego spadku ciśnienia. W niniejszej pracy przedstawiono badania eksperymentalne wydajności cieplnej i hydrodynamicznej prototypowego wymiennika ciepła z minikanałami. Badany wymiennik ciepła posiadał 17 prostych, równoległych minikanałów o kwadratowym kształcie przekroju poprzecznego, średnicy hydraulicznej 1 mm i długości 100 mm. Wymiennik posiadał również dwa kolektory wlotowe i wylotowe o prostokątnym przekroju poprzecznym. Zarówno minikanały, jak i kolektory wykonano symetrycznie po obu stronach pojedynczej aluminiowej płytki metodą frezowania. Pomiary eksperymentalne przeprowadzono dla jednofazowego przepływu wody destylowanej w konfiguracji przeciwprądowej w zakresie liczby Reynoldsa Re=171÷1061 po stronie zimnej oraz Re=239÷2091 po stronie gorącej w minikanałach. Wskaźniki wydajności cieplnej i hydrodynamicznej otrzymano na podstawie pomiarów eksperymentalnych parametrów cieplnych i przepływowych, w tym całkowitej mocy cieplnej, spadku ciśnienia i objętościowego natężenia przepływu. Wyniki przedstawiono w funkcji średniej liczby Reynoldsa po stronie gorącej i zimnej w minikanałach, które porównano z wartościami z literatury otrzymanymi dla wymienników ciepła z mikrokanałami. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że wydajność cieplna badanego wymiennika ciepła z minikanałami jest zbliżona do wydajności cieplnej przykładowych wymienników ciepła z mikrokanałami o 10-krotnie mniejszych średnicach hydraulicznych, a wskaźnik wydajności hydrodynamicznej badanego wymiennika ciepła z minikanałami przewyższa wydajność hydrodynamiczną przykładowych wymienników ciepła z mikrokanałami.

Nowa generacja płynów dielektrycznych – badania eksperymentalne nad zamiennikiem HFE-7100

PAWEŁ DĄBROWSKI[1], *MAJA KASZUBA*[1], *REHAN KHAN*[1]
RITUNESH KUMAR[1,2] *DARIUSZ MIKIELEWICZ*[1]

[1] Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Energii
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
[2] Indian Institute of Technology Indore
Department of Mechanical Engineering, Khandwa
Road, Simrol
e-mail: pawel.dabrowski@pg.edu.pl

Słowa kluczowe: mikrożebrowy radiator, płyn dielektryczny, chłodzenie elektroniki, wymiana ciepła

Z uwagi na intensywny rozwój w dziedzinie sztucznej inteligencji poszukiwanie skutecznych metod chłodzenia elektroniki pozostaje w centrum zainteresowania inżynierów na całym świecie. W najnowszym procesorze Intel Core Ultra 9 285K pobór mocy elektrycznej może osiągać 250 W, co przy jego wymiarach 45,0 mm × 37,5 mm odpowiada gęstości strumienia ciepła na poziomie 148 kW/m². Jednocześnie temperatura pracy nie powinna przekraczać 105°C ze względu na ryzyko awarii. Przy tak wysokich parametrach eksploatacyjnych klasyczne chłodzenie powietrzne staje się niewystarczające, natomiast chłodzenie cieczą – konieczne. Wybór odpowiedniego medium chłodzącego jest zatem równie istotny jak konstrukcja radiatora.

Cieczą dielektryczną powszechnie stosowaną do chłodzenia elektroniki jest Novec HFE-7100, wprowadzona na rynek w 1996 roku. Po niemal 30 latach została ona jednak wycofana z produkcji. Decyzja ta wiąże się z projektem regulacyjnym ogłoszonym przez Europejską Agencję Chemikaliów (ECHA), dotyczącym całkowitego wycofania z obiegu substancji per- i polifluoroalkilowych (PFAS), do których zaliczany jest Novec HFE-7100. W odpowiedzi na planowane zmiany regulacyjne producenci wprowadzają na rynek nowe płyny spełniające wymagania ECHA, przeznaczone jako zamienniki wycofywanych substancji. Jednym z nich jest Thermasolv IM1, opisywany jako identyczny zamiennik Novec HFE-7100.

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz analizę cieplno-przepływową czynników chłodzących Novec HFE-7100 i Thermasolv IM1. Oceniono efektywność chłodzenia oraz spadki ciśnienia podczas przepływu w mikrożebrowym radiatorze o wymiarach zewnętrznych 40 mm × 40 mm. Radiator składał się z 625 żeber o przekroju kwadratowym (0,8 mm × 0,8 mm) i wysokości 0,8 mm.

Celem badań było porównanie oraz ewaluacja właściwości użytkowych obu płynów dla różnych warunków pracy. Mimo że Thermasolv IM1 jest opisywany jako identyczny zamiennik Novec HFE-7100, analiza jego właściwości wykazała różnice w wybranych parametrach fizykochemicznych. Podobnie jak Novec HFE-7100, Thermasolv IM1 wrze w temperaturze 61°C, jednak jego gęstość jest wyższa o 12,2 kg/m^3, co sugeruje możliwość występowania odmiennych charakterystyk cieplno-przepływowych radiatora. Ponadto, nowy czynnik charakteryzuje się nieco wyższym od Novec HFE-7100 współczynnikiem GWP oraz zerowym wskaźnikiem ODP.

Badania przedstawione w niniejszej pracy zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu SONATA 19 nr 2023/51/D/ST8/01989 w latach 2024–2027.

Wpływ położenia źródła ciepła na konwekcję swobodną w zamkniętej przestrzeni wypełnionej cieczą dielektryczną

MIKOŁAJ KOŁTONOWSKI, MAŁGORZATA SIKORA, TADEUSZ BOHDAL

Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
e-mail: mikolaj.koltonowski@s.tu.koszalin.pl

Słowa kluczowe: jednofazowe chłodzenie immersyjne, ciecze dielektryczne, konwekcja swobodna, chłodzenie elektroniki

W pracy przeanalizowano wpływ lokalizacji elementu grzejnego na intensywność konwekcji swobodnej w zamkniętej przestrzeni wypełnionej cieczą dielektryczną. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla różnych wysokości zanurzenia przy zachowaniu stałych parametrów wejściowych. Jako źródło ciepła posłużył sześcienny rezystor ceramiczny, natomiast rolę chłodziwa pełnił płyn dielektryczny Shell S5X. Na podstawie wyznaczonych eksperymentalnie wartości współczynnika przejmowania ciepła oraz opracowanej aproksymacji wyników określono optymalne zanurzenie rezystora w celu jak najintensywniejszego odbioru ciepła przez ciecz. Na podstawie wykonanych badań eksperymentalnych wyznaczono zależność opisującą ten parametr. Otrzymano funkcję, która pozwala na identyfikacje optymalnego położenia elementu grzejnego, w celu utrzymania jego odpowiedniej temperatury poprzez maksymalizację konwekcji swobodnej w założonych warunkach. Uzyskane wyniki wskazują, że odpowiedni dobór położenia elementu grzejnego może prowadzić do poprawy warunków chłodzenia bez ingerencji we właściwości fizyczne cieczy. Przedstawiona analiza może mieć zastosowania w projektowaniu systemów chłodzenia zanurzeniowego elementów elektronicznych oraz innych układach chłodzenia wykorzystującego konwekcję naturalną jako dominujący mechanizm wymiany ciepła.

Wyznaczanie współczynnika przejmowania ciepła w kompozycie pianka metalowa – materiał zmiennofazowy na podstawie geometrii uproszczonej

WOJCIECH PIÓRKOWSKI, JERZY BANASZEK
MACIEJ JAWORSKI, MIROSŁAW SEREDYŃSKI
Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa
e-mail: wojciech.piorkowski2.dokt@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: pianka metalowa, materiał zmiennofazowy, symulacja numeryczna, współczynnik przejmowania ciepła, mikroskala

Materiały zmiennofazowe (ang. *phase change material*, PCM), ze względu na swoje właściwości (np. wysokie ciepło przemiany fazowej, niewielki przedział temperatur przemiany fazowej) pozwalają na efektywne magazynowanie energii wewnętrznej. Jednak, ze względu na ich niski współczynnik przewodzenia ciepła poszukiwane są sposoby intensyfikacji tempa wnikania ciepła w te materiały. Spośród proponowanych rozwiązań szczególnie interesującym są pianki metalowe o otwartych porach. Oferują one wysokie wartości współczynnika przewodzenia ciepła, powierzchni właściwej oraz porowatości. Pomimo poprawy rozprowadzania ciepła w PCM wprowadzają one również mikrostrukturę wewnętrzną która hamuje przepływ roztopionego materiału i utrudnia konwekcyjną wymianę ciepła.

Do symulacji pracy realnych magazynów ciepła z kompozytem pianka metalowa – PCM wykorzystywane są makroskalowe modele, oparte na procedurze uśrednień objętościowych. Wymagają identyfikacji efektywnych parametrów opisujących cechy ośrodka i zachodzących w nim procesów. Dla wymiany ciepła w modelu nierównowagowym kluczowe znaczenie ma współczynnik przejmowania ciepła (ang. *heat transfer coefficient*, HTC).

W przedstawionej pracy, w celu wyznaczenia HTC przeprowadzono symulacje w skali pojedynczych porów wykorzystując sparametryzowane i uproszczone geometrie pianki metalowej. Rozpatrywana w tym przypadku domena obliczeniowa stanowi prostopadłościenny, powtarzalny wycinek kompozytu pianki metalowej i PCM.

Uśrednione czasowo i przestrzennie przebiegi strumieni ciepła na powierzchni styku materiałów oraz średnie temperatury obu materiałów pozwoliły na wyznaczenie średnich współczynników HTC.

Wyznaczony HTC na początku, procesu wykazuje silny trend spadkowy. Następnie po osiągnięciu lokalnego minimum rośnie do nowej, wyższej wartości. Wyniki sugerują również wpływ gęstości porów na wymianę ciepła i masy w kompozycie i istnienie

optymalnej geometrii pianki w badanym zakresie warunków wymiany ciepła. HTC został porównany do współczynnika wyznaczonego na podstawie wzorów kryterialnych na konwekcję naturalną wokół walca oraz współczynnika wyliczonego na podstawie stałej różnicy temperatur.

Wykonane symulacje numeryczne pozwalają wniknąć w mikrostrukturę pianki i zaobserwować zachodzące w niej zjawiska. Przedstawiona metoda uzyskiwania uśrednionego objętościowego współczynnika przejmowania ciepła może przyczynić się do poprawienia dokładności symulacji wymiany ciepła i masy w kompozytach z pianką metalową i materiałem zmiennofazowym.

Koncepcja systemu pomiarowego do analizy obrazów przepływów dwufazowych w minikanałach

MATEUSZ CEDZYŃSKI [1], MAGDALENA PIASECKA [2]
ROBERT KAZAŁA [1], ARTUR PIASECKI [3]

[1] Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
[2] Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
[3] Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geodezji i Energetyki Odnawialnej
al.Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce
e-mail: apiasecki@tu.kielce.pl

Słowa kluczowe: minikanał, przepływ dwufazowy, wrzenie w przepływie, analiza obrazu, stopień zapełnienia, synchronizacja pomiarowa.

W pracy przedstawiono koncepcję zintegrowanego systemu pomiarowego przeznaczonego do rejestracji oraz ilościowej analizy obrazów struktur dwufazowych występujących podczas wrzenia w przepływie w minikanałach. Motywacją jest potrzeba jednoczesnego powiązania obserwowanych struktur przepływu (np. pęcherzykowego, korkowego, pierścieniowego) z lokalnymi warunkami cieplno-przepływowymi oraz parametrami używanymi w modelach oporów przepływu i wymiany ciepła.

Proponowane rozwiązanie obejmuje przezroczystą sekcję obserwacyjną minikanału z kontrolowanym doprowadzeniem strumienia ciepła oraz układ wizyjny (kamera o wysokiej prędkości rejestracji, obiektyw o odpowiedniej skali odwzorowania, stabilizowane oświetlenie i ekranowanie od refleksów). Dodatkowym torem pomiarowym jest termowizja, umożliwiająca rejestrację rozkładu temperatury zewnętrznej powierzchni ścianki grzejnej w funkcji czasu i położenia. System uzupełniają czujniki procesowe (natężenie przepływu masowego, ciśnienie na wlocie/wylocie, temperatura na wlocie/wylocie oraz sygnały z układu grzania), a całość jest synchronizowana czasowo w celu jednoznacznego przypisania klatek obrazu wizyjnego i termogramów do chwilowych warunków pracy.

Część analityczna obejmuje łańcuch przetwarzania obrazu: kalibrację geometryczną, korekcję tła i zniekształceń optycznych, segmentację faz (z uwzględnieniem zmiennych warunków oświetlenia), detekcję i śledzenie obiektów (pęcherzy/struktur gazowych), a następnie wyznaczanie wielkości opisujących przepływ: udziału objętościowego (stopień zapełnienia) w przekroju obserwacji, rozkładów długości i prędkości struktur, częstotliwości ich występowania, wskaźników falowania interfejsu oraz cech teksturalnych umożliwiających automatyczną identyfikację struktur. Wynikiem systemu ma być zestaw metryk obrazowych i klasyfikację struktur przepływu, gotową do bezpośredniego wykorzystania w walidacji modeli analitycznych, analityczno-numerycznych i numerycznych oraz w budowie modeli predykcyjnych opartych o uczenie maszynowe.

Zależności kryterialne liczby Nusselta dla przepływu wybranych płynów chłodniczych w minikanałach prostokątnych wyznaczone metodami uczenia maszynowego z wykorzystaniem odtwarzalnej procedury przetwarzania danych eksperymentalnych

MAGDALENA PIASECKA
Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce
e-mail: tmpmj@tu.kielce.pl

Słowa kluczowe: wymiana ciepła; wrzenie w przepływie; minikanał prostokątny; liczba Nusselta; uczenie maszynowe

W pracy przedstawiono podejście do wyznaczania zależności kryterialnych liczby Nusselta dla przepływu wybranych płynów chłodniczych w minikanałach prostokątnych, opracowane z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego oraz odtwarzalnej procedury przetwarzania danych. Podstawą analiz były serie eksperymentów prowadzonych w modułach minikanałowych o geometrii prostokątnej, różniących się orientacją oraz liczbą kanałów równoległych, co pozwoliło ocenić przenośność zaproponowanego podejścia pomiędzy konfiguracjami i płynami. Kluczowym elementem metody była odtwarzalna procedura przetwarzania danych, która przekształcała surowe pliki pomiarowe oraz pola temperatury ścianki uzyskane z termografii IR do ujednoliconego zbioru danych w formacie Parquet. Zbiór zawierał lokalne rekordy na wspólnej siatce osiowej oraz jawną kontrolę jakości. W obliczeniach uwzględniono szacowanie strat ciepła do otoczenia (konwekcja swobodna i promieniowanie) oraz korektę przewodzenia ciepła przez folię grzejną, co umożliwiło spójne wyznaczanie lokalnego strumienia ciepła, współczynnika przejmowania ciepła oraz liczby Nusselta. Obszary wrzenia określano na podstawie przegrzania ścianki względem temperatury nasycenia z wprowadzonym pasmem niejednoznaczności, a próbki niejednoznaczne eliminowano przed etapem modelowania. Do identyfikacji zależności zastosowano modele zespołowe drzew decyzyjnych (Random Forest, ExtraTrees) trenowane w przestrzeni logarytmicznej jako narzędzie do opisu nieliniowych powiązań pomiędzy liczbą Nusselta a wybranymi liczbami podobieństwa i warunkami lokalnymi. Ocenę modeli prowadzono z podziałem danych według identyfikatora eksperymentu (walidacja grupowa). Następnie, na podstawie wyników uczenia maszynowego, wyznaczono inżynierskie postacie zależności potęgowych dopasowane oddzielnie

dla obszaru wrzenia przechłodzonego i nasyconego. Zaproponowane podejście umożliwia systematyczne rozszerzanie bazy o kolejne płyny i konfiguracje oraz prowadzenie porównań między seriami przy zachowaniu spójnych definicji wielkości, kryteriów jakości i protokołu walidacji.

Wrzenie w przepływie w minikanale prostokątnym: pomiary eksperymentalne, wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła i porównanie z zależnościami kryterialnymi z literatury

RADOSŁAW JANKOWSKI[1], *MAGDALENA PIASECKA*[2]

[1] Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
[2] Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
[1] al.Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce
[2] ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań
e-mail: tmpmj@tu.kielce.pl

Słowa kluczowe: wymiana ciepła, przepływ, wrzenie, minikanał, eksperyment, czynniki chłodnicze

Rozpoznanie przebiegu wymiany ciepła podczas wrzenia w minikanałach jest kluczowe dla projektowania kompaktowych wymienników i układów chłodzenia, jednak pozostaje obarczone niepewnością wynikającą z silnej wrażliwości zjawisk na warunki brzegowe, własności termofizyczne oraz straty ciepła do otoczenia. W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wrzenia w przepływie w minikanale prostokątnym z jednostronnie ogrzewaną ścianką, ze szczególnym uwzględnieniem wyznaczania lokalnych parametrów wymiany ciepła.

Część eksperymentalna obejmowała pomiar masowego natężenia przepływu, ciśnienia oraz temperatury czynnika chłodniczego na wlocie i wylocie modułu testowego z minikanałami, rejestrację parametrów elektrycznych zasilania folii ze stopu Haynes 230 stanowiącej ściankę grzejną, a także bezkontaktowy pomiar pola temperatury zewnętrznej powierzchni folii z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. Dodatkowo prowadzono obserwacje jakościowe struktur przepływu dwufazowego. Moduł testowy zawierał kilka równoległych minikanałów o przekroju prostokątnym i głębokości 1 mm. Analizę przeprowadzono dla kilku ustawień modułu, tj. przy zmiennej orientacji przestrzennej względem płaszczyzny poziomej. Na podstawie bilansu energii (z uwzględnieniem strat ciepła do otoczenia) wyznaczono lokalny strumień ciepła oddawany do płynu oraz lokalny współczynnik przejmowania ciepła i liczbę Nusselta wzdłuż kanału.

Wyniki uzyskane dla różnych orientacji przestrzennych modułu testowego oraz dla wybranych wielkości cieplno-przepływowych zestawiono z wynikami obliczeń otrzymanymi na podstawie wybranych zależności kryterialnych z literatury dla wrzenia w przepływie, w szczególności opracowanych dla kanałów o małej średnicy hydraulicznej. Porównanie umożliwiło ocenę zgodności trendów i odchyleń, wskazanie zakresów warunków, w których zależności tracą trafność, oraz identyfikację czynników najbardziej

wpływających na rozbieżności (m.in. modelowanie strat ciepła, dobór własności termofizycznych, definicja temperatury referencyjnej płynu oraz niejednorodność pola temperatury ścianki). Wyniki stanowią podstawę do dalszej walidacji modeli obliczeniowych oraz doboru narzędzi inżynierskich do prognozowania wymiany ciepła w minikanałach.

Określenie intensywności wymiany ciepła na powierzchniach rozwiniętych podczas wrzenia etanolu

NORBERT DADAS [1, 2], *ROBERT PASTUSZKO* [1, 2]

[1] Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce
[2] Główny Urząd Miar
ul. Elektoralna 2, 00-139 Warzawa
e-mail: ndadas@tu.kielce.pl

Słowa kluczowe: minikanały, wrzenie pęcherzykowe, powierzchnie rozwinięte, materiały porowate, współczynnik przejmowania ciepła.

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych podczas wrzenia pęcherzykowego etanolu na miedzianych powierzchniach z minikanałami częściowo wypełnionymi elementami porowatymi w postaci piany oraz siatki miedzianej. Pomiary wykonano przy ciśnieniu atmosferycznym dla pięciu konfiguracji wypełnień. Wyznaczone gęstości strumienia ciepła i współczynniki przejmowania ciepła porównano z wynikami dla minikanałów bez wypełnień oraz powierzchni płaskiej. W stosunku do powierzchni płaskiej uzyskano wzrosty: współczynnika przejmowania ciepła o 80% i gęstości strumienia ciepła o 163%, natomiast dla minikanałów bez wypełnień analogicznie o 13% i 26%. Zauważono również, że struktury porowate obniżały przegrzanie związane z początkiem wrzenia pęcherzykowego. Praca udowadnia, że dodatkowe rozwinięcie w postaci elementów porowatych pozwala znacząco zwiększyć efektywność wymiany ciepła w porównaniu zarówno do minikanałów bez wypełnień porowatych, jak i powierzchni płaskiej.

Badania eksperymentalne oraz symulacje CFD przepływu i wymiany ciepła w minikanale pierścieniowym

KRZYSZTOF GALISZEWSKI[1], *MAGDALENA PIASECKA*[1]
PAWEŁ ŁABĘDZKI[2]

[1] Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
[2] Politechnika Świętokrzyska, Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego
al.Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce
e-mail: kgaliszewski@tu.kielce.pl

Słowa kluczowe: wymiana ciepła, przepływ, minikanał, eksperyment, CFD, walidacja

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych przepływu i wymiany ciepła w minikanale pierścieniowym. Ze względu na geometrię szczeliny i krzywiznę powierzchni w kanale pierścieniowym występują niejednorodne rozkłady prędkości i temperatury, co zwiększa wymagania dotyczące poprawnego zdefiniowania warunków brzegowych oraz uwzględnienia strat ciepła podczas porównań eksperyment – CFD.

Część eksperymentalna obejmowała pomiar temperatury ścianki metodą kontaktową z użyciem termopar, a także rejestrację temperatury i ciśnienia płynu na wlocie i wylocie oraz masowego natężenia przepływu. Strumień ciepła wyznaczano na podstawie parametrów zasilania układu grzejnego. Na podstawie danych doświadczalnych przygotowano model CFD w programie Simcenter STAR-CCM+ odwzorowujący geometrię kanału pierścieniowego i warunki pracy stanowiska. Model obejmował sprzężone obliczenia przepływu i przewodzenia ciepła w ściankach, z zadanym strumieniem ciepła na powierzchni grzejnej oraz warunkami wlotowymi i wylotowymi wynikającymi z pomiarów. Omówiono dobór warunków brzegowych, modeli fizycznych oraz sposób uwzględnienia strat ciepła do otoczenia. Zastosowano strategię siatkowania ukierunkowaną na poprawne odwzorowanie warstwy przyściennej w szczelinie pierścieniowej oraz przeprowadzono analizę wrażliwości wyników na zagęszczenie siatki.

Walidację obliczeń numerycznych przeprowadzono poprzez porównanie temperatury ścianki w punktach pomiarowych, temperatury płynu na wylocie oraz ciśnienia na wlocie kanału. Dodatkowo kontrolowano spójność bilansu energii na podstawie mocy doprowadzanej i przyrostu entalpii płynu. Zestawienie wyników pozwoliło ocenić zdolność modelu CFD do odwzorowania zjawisk cieplno-przepływowych w kanale pierścieniowym oraz zidentyfikować czynniki najbardziej wpływające na rozbieżności, w tym przede wszystkim parametry siatki (zagęszczenie w szczelinie i przy ściankach, jakość elementów, odwzorowanie warstwy przyściennej) oraz sposób zadania strumienia ciepła i uwzględnienia strat do otoczenia.

Optymalizacja porowatości w wymiennikach TPMS 316L wytwarzanych metodą SLM: równoważenie intensyfikacji wymiany ciepła i zużycia energii

MARCIN KRUZEL, TADEUSZ BOHDAL
KRZYSZTOF DUTKOWSKI, GRZEGORZ ROBAKOWSKI

Politechnika Koszalińska
ul. Racławicka 15-17, 75-620 Koszalin
email: marcin.kruzel@tu.koszalin.pl, tadeusz.bohdal@tu.koszalin.pl
krzysztof.dutkowski@tu.koszalin.pl, grzegorz.robakowski@tu.koszalin.pl

Słowa kluczowe: Wymienniki ciepła TPMS, Selektywne topienie laserowe (SLM), Stal nierdzewna 316L, Porowatość strukturalna

Wymienniki ciepła TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) produkowane metodą selektywnego topienia laserowego (SLM) ze stali nierdzewnej 316L charakteryzują się wysoką gęstością powierzchniową i silnym przekierowaniem przepływu, co umożliwia lepsze przenoszenie ciepła w szerokim zakresie warunków przepływu. Jednak wpływ porowatości TPMS na rozpraszanie energii pozostaje niedostatecznie poznany, szczególnie w przypadku uwzględnienia zarówno przepływów laminarnych, jak i turbulentnych. Niniejsze badanie systematycznie analizuje wpływ porowatości TPMS na wydajność termohydrauliczną i zużycie energii w pełnym zakresie pracy, od przepływu laminarnego do turbulentnego.

Zaprojektowano i wykonano serię rdzeni wymienników ciepła TPMS o różnym poziomie porowatości, zachowując jednakowe wymiary zewnętrzne. Eksperymenty przeprowadzono z użyciem wody jako czynnika roboczego w warunkach ustalonych, obejmujących liczby Reynoldsa od Re = 200 do 20 000. Wydajność wymiany ciepła została scharakteryzowana za pomocą liczby Nusselta (Nu), natomiast straty hydrauliczne i rozpraszanie energii zostały skwantyfikowane za pomocą liczby Eulera (Eu), spadku ciśnienia i wymaganej mocy pompowania. Sprzężone zachowanie termohydrauliczne zostało ocenione za pomocą kryterium oceny wydajności (PEC) i współczynnika efektywności energetycznej (η_energy), zdefiniowanego jako stosunek wzrostu wymiany ciepła do odpowiadającego mu wzrostu mocy pompowania.

Wyniki ujawniają odmienne mechanizmy zależne od porowatości w różnych reżimach przepływu. W reżimie laminarnym zmniejszona porowatość sprzyja wczesnej destabilizacji przepływu i mieszaniu indukowanemu przez krzywiznę, co prowadzi do znacznego wzrostu Nu przy umiarkowanym wzroście Eu. Natomiast w warunkach turbulentnych dalsza redukcja porowatości prowadzi do nieproporcjonalnego wzrostu rozpraszania

energii, co skutkuje spadkiem PEC i η_energy pomimo ciągłego wzrostu wymiany ciepła. Optymalne okno porowatości zidentyfikowano dla przejściowych liczb Reynoldsa, gdzie maksymalizowana jest sprawność termohydrauliczna.

Wyniki wskazują, że konstrukcja wymiennika ciepła TPMS musi uwzględniać rozpraszanie energii zależne od przepływu, a nie wyłącznie poprawę wymiany ciepła. Przedstawione wyniki dostarczają ilościowych wytycznych dotyczących doboru porowatości w energooszczędnych wymiennikach ciepła TPMS 316L, wytwarzanych metodą SLM, pracujących w szerokim zakresie liczb Reynoldsa.

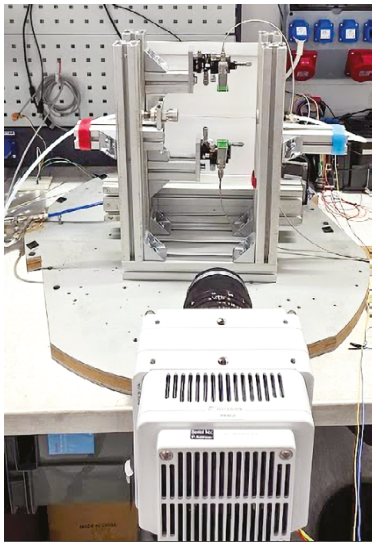
Experimental study of capillary film asymmetry – comparison with existing liquid film thickness correlations

ANDRZEJ I. NOWAK[1], *TOMASZ DURAZIŃSKI*[1]
DAISUKE TSUNEOKA[2], *JUNNOSUKE OKAJIMA*[2]

[1] Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
[2] Institute of Fluid Science, Tohoku University
2-1-1, Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980–8577, Japan
e-mail: an.nowak@pwr.edu.pl

Keywords: liquid film, two-phase flow, liquid film thickness asymmetry, capillary forces

In near the capillary limit channels, a very thin capillary liquid film plays a crucial role in determining flow resistance, heat transfer, and interface stability. Understanding how this film behaves under conditions where capillary and gravitational forces are comparable is essential in applications involving heat transfer.



The aim of the study is to investigate the asymmetry of the liquid film thickness formed in circular channels (3 and 4 mm) during the two-phase flow of ethanol liquid and vapour. The diameters were selected so that the Bond number (*Bo*) was slightly less and slightly greater than 4 – the limit at which the transition from the dominance of capillary to the dominance of buoyancy forces occurs.

The experimental methodology was based on the measurement of the thickness of the capillary film and the vapour bubble velocity. The film thickness was determined at one point of the channel using a Keyence CL-3000 confocal sensors with an accuracy of 1.3 μm. Simultaneously, images were recorded with a Phantom VEO340L high-speed camera operating at 1000 fps and then analysed with custom software to determine the velocity.

The results revealed a clear film asymmetry in the 4 mm tube ($Bo > 4$). At the bottom of the channel the film was several times thicker than at the top, indicating a significant influence of buoyancy forces. When capillary forces should dominate the flow (3 mm/$Bo < 4$), asymmetry was also observed, but to a lesser extent than for the 4 mm tube. The obtained values were compared both with classical correlations describing a symmetrical capillary flow film – such as Taylor's law – and with newer approaches. The models systematically underestimated the thickness of the layer at the bottom wall and overestimated it at the top.

The combination of confocal method with high-speed camera recordings proved to be an effective tool for measuring film thickness and vapour bubble velocity. The data obtained fills an important gap in the characterisation of asymmetric capillary films on a millimetre scale.

Part of the work was carried out under the Collaborative Research Project of the Institute of Fluid Science, Tohoku University (Project code: J25I060), and National Science Centre under OPUS project number 2024/55/B/ST8/01704. Part of the data analysis was performed using resources provided by Wroclaw Centre for Networking and Supercomputing via grant 441 (*http://wcss.pl*).

Physics-Informed Generative Design of Hybrid TPMS Compact Heat Exchanger Cores using Neural Operators

MOIZUDDIN S. KHAJA, DARIUSZ MIKIELEWICZ

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny
ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: moizuddin.khaja@pg.edu.pl

Keywords: triply periodic minimal surface; compact heat exchanger; conjugate heat transfer; neural operator; inverse design

Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) lattices are increasingly adopted in compact heat exchangers and thermal management applications due to their high surface area-to-volume ratios. However, optimizing these complex topologies remains computationally prohibitive, as traditional Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations are expensive and frequently encounter meshing instabilities across large topology spaces. This work presents a physics-consistent deep learning framework to accelerate the design of hybrid TPMS heat exchanger cores by replacing repeated CFD evaluations with a geometry-informed neural operator surrogate. Unlike conventional scalar surrogate models that predict only integral performance metrics, the proposed model predicts the full three-dimensional fields of velocity, pressure, and temperature. This field-resolved formulation enables explicit verification of mass conservation and energy balance, preserving physical interpretability during optimization.

To construct a robust training dataset, we introduce a volumetric heat-generation benchmark in which the TPMS lattice is modeled as an actively heated solid embedded within a single-fluid laminar channel ($Re < 500$). This decoupled conjugate configuration eliminates numerical instabilities commonly observed in dual-fluid exchanger simulations and enables an automated, geometry-consistent workflow. A 3D Fourier Neural Operator (FNO) is trained on large-scale high-fidelity dataset of hybrid Primitive-Gyroid-Diamond architectures, learning to map voxelized signed distance functions (SDF) directly to full 3D fields of velocity vector components, pressure, and temperature.

The proposed framework demonstrates high fidelity compared to ground-truth CFD, effectively capturing local flow stagnation zones and thermal gradients that standard scalar models fail to resolve. By exploiting the differentiable nature of the operator, we perform gradient-based inverse design to simultaneously minimize hydraulic resistance and peak solid temperatures. This approach reduces the computational effort for design exploration by orders of magnitude, enabling the discovery of counterintuitive, non-standard hybrid topologies that outperform uniform lattices in the laminar regime.

Analiza oporów przepływu i wymiany ciepła podczas wrzenia czynników chłodniczych w miniszczelinie pierścieniowej

WOJCIECH WOLAK, SYLWIA HOŻEJOWSKA, MAGDALENA PIASECKA

Politechnika Świętokrzyska
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce
e-mail: fizww@tu.kielce.pl

Słowa kluczowe: miniszczelina, opory przepływu, wymiana ciepła, wrzenie w przepływie, współczynnik przejmowania ciepła

W pracy skoncentrowano się na analizie spadków ciśnienia towarzyszących przepływowi wrzących czynników chłodniczych HFE-7000 oraz HFE-7100 przez pierścieniową miniszczelinę.

Kluczowym elementem stanowiska doświadczalnego była sekcja testowa zawierająca miniszczelinę utworzoną pomiędzy zewnętrzną rurą szklaną a współosiowo umieszczoną miedzianą rurą o rozwiniętej powierzchni, szerokość szczeliny wynosiła 1 mm. Wewnątrz rury miedzianej zainstalowano osiowo grzałkę patronową zasilaną z autotransformatora, umożliwiającego regulację natężenia prądu. W kolektorach wlotowym i wylotowym zamontowano przetworniki ciśnienia względnego oraz czujniki temperatury, co umożliwiło pomiar ciśnienia i temperatury płynu roboczego na wlocie i wylocie z miniszczeliny. Podczas badań czynnik chłodniczy cyrkulował w obiegu głównym instalacji. Strumień ciepła przekazywany do grzałki zwiększano stopniowo poprzez regulację jej mocy, co wiązało się ze wzrostem dostarczanej mocy elektrycznej. Rejestrowano sygnały z termopar i przetworników ciśnienia, wartość mocy grzewczej oraz natężenie przepływu masowego, korzystając ze stacji akwizycji danych.

Celem pracy było określenie całkowitych oporów przepływu oraz współczynnika przejmowania ciepła pomiędzy ogrzewaną ścianką miniszczeliny a czynnikiem roboczym. W analizie teoretycznej przyjęto uproszczenie geometryczne polegające na rozpatrywaniu zagadnienia w układzie współrzędnych kartezjańskich. Rzeczywistą, osiowo-symetryczną strukturę modułu pomiarowego zastąpiono modelem płaskim, w którym poszczególne pierścienie konstrukcyjne odwzorowano jako równoległe przegrody o określonej grubości i właściwościach termofizycznych. Otrzymane rezultaty zestawiono z wynikami obliczeń wykonanych przy użyciu zależności kryterialnych dostępnych w literaturze. W opracowanym modelu wymiany ciepła przyjęto, że rozkłady temperatury grzejnika i czynnika chłodniczego spełniają równania zachowania energii wraz z odpowiednimi

warunkami brzegowymi. Układ równań rozwiązano metodą Trefftza, a lokalne wartości współczynnika przejmowania ciepła na granicy ściana grzejna–płyn wyznaczono z warunku brzegowego trzeciego rodzaju.

Uzyskane wyniki zaprezentowano w postaci wykresów przedstawiających rozkłady temperatury wzdłuż powierzchni grzejnej i w płynie, a także zmiany oporów przepływu oraz współczynników przejmowania ciepła w funkcji czasu i odległości od wlotu do miniszczeliny.

Wpływ stężenia roztworu glikolu propylenowego na sprawność

IZABELA CĘKIEL [1], ROBERT PASTUSZKO[2], ROBERT KANIOWSKI[2]

[1]GUM, [2]Politechnika Świętokrzyska

Słowa kluczowe: HVAC, glikol propylenowy, czynnik pośredniczący, sprawność

Roztwory glikolu propylenowego należą do najczęściej stosowanych cieczy pośredniczących w instalacjach HVAC, w których pełnią funkcję czynnika pośredniczącego uczestniczącego w procesie przekazywania energii cieplnej w wymiennikach ciepła. Zastosowanie czynnika pośredniczącego umożliwia rozdzielenie części instalacji pracujących w odmiennych zakresach temperatur, zwiększając bezpieczeństwo eksploatacyjne oraz zapewniając stabilność parametrów pracy w warunkach niskotemperaturowych. Glikol propylenowy, ze względu na zdolność obniżania temperatury krzepnięcia roztworów wodnych, niską toksyczność oraz korzystne właściwości fizykochemiczne, znajduje szerokie zastosowanie w układach grzewczych, chłodniczych oraz systemach odzysku ciepła. Stężenie roztworu glikolu propylenowego stanowi parametr decydujący o właściwościach termofizycznych cieczy pośredniczącej. Zmiany stężenia glikolu prowadzą do zmiany min. lepkości kinematycznej i dynamicznej, gęstości oraz przewodności cieplnej, które bezpośrednio wpływają na warunki wymiany ciepła po stronie cieczy pośredniczącej. Właściwości te kształtują wartość współczynnika przejmowania ciepła, a w konsekwencji oddziałują na strumień ciepła przekazywany w wymienniku. Z punktu widzenia opisu procesu wymiany ciepła kluczowe znaczenie ma zatem analiza zależności pomiędzy właściwościami termofizycznymi czynnika pośredniczącego a parametrami cieplnymi wymiennika. W pracy oceniony został wpływ stężenia roztworu glikolu propylenowego na proces przekazywania ciepła w wymienniku ciepła pracującym w instalacji HVAC. Badania prowadzono w warunkach zmiennej konwekcji wymuszonej powietrza, odpowiadających typowym zakresom parametrów eksploatacyjnych. Analiza uzyskanych danych eksperymentalnych może dostarczyć informacji na temat roli stężenia roztworu glikolu propylenowego w procesie przekazywania ciepła, z uwzględnieniem wpływu właściwości termofizycznych roztworu na parametry pracy wymiennika.

Badanie wrzenia czynników chłodniczych w kompaktowym wymienniku ciepła wykonanych technologią przyrostową

TADEUSZ BOHDAL, MARCIN KRUZEL, GRZEGORZ ROBAKOWSKI

Politechnika Koszalińska
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin
e-mail: tadeusz.bohdal@tu.koszalin.pl, marcin.kruzel@tu.koszalin.pl
grzegorz.robakowski@tu.koszalin.pl

Słowa kluczowe: wrzenie, wymiana ciepła, miniwymienniki, proekologiczne czynniki chłodnicze, zależności obliczeniowe, druk 3D

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dotyczących wrzenia proekologicznych czynników chłodniczych w kompaktowych płaszczowo-rurowych wymiennikach ciepła wytworzonych metodą przyrostową. Proces wrzenia zachodził w mikroprzestrzeni płaszcza wymiennika, na powierzchni poziomych rur ogrzewanych od wewnątrz strumieniem ciepłej wody. Analizę przeprowadzono dla pięciu czynników chłodniczych: R1233zd, R1234ze, R1234yf, R134a oraz HFE7100.

W ramach badań zaprojektowano i wykonano nowe struktury miniwymienników ciepła oraz opracowano profile termiczne opisujące przebieg procesu wymiany ciepła, ze szczególnym uwzględnieniem procesu wrzenia w minikompaktowych wymiennikach ciepła. Stwierdzono, że w przypadku wrzenia w mikroprzestrzeni występuje wykładnicza zależność współczynnika przejmowania ciepła od gęstości strumienia ciepła na ogrzewanej powierzchni.

Na podstawie wyników badań zaproponowano autorski model empiryczny umożliwiający wyznaczanie współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia czynników chłodniczych w miniprzestrzeni na powierzchni poziomych rur. Opracowana korelacja pozwala na wyznaczanie wartości współczynnika przejmowania ciepła z dokładnością około ±25%. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych porównano z danymi dostępnymi w literaturze, wykazując dobrą zgodność z wybranymi modelami literaturowymi.

Badania nieustalonej pracy przemysłowych wymienników ciepła przy użyciu modeli matematycznych stanu ustalonego po stronie czynnika o niższym strumieniu pojemności cieplnej

MARIUSZ GRANDA, MARCIN TROJAN

Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Procesów Cieplnych, Ochrony Powietrza i Utylizacji Odpadów
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: mariusz.granda@pk.edu.pl

Słowa kluczowe: wymienniki ciepła, nieustalony, pojemność cieplna, stała czasowa, modelowanie numeryczne

Aktualnie każda branża przemysłu, z uwagi na rosnący udział OZE (Odnawialnych Źródeł Energii) i jego wpływ na krajowy system elektroenergetyczny, narażana jest na zmienne warunki pracy całej instalacji. Wobec tego, coraz częściej pojawia się potrzeba badań nieustalonych stanów pracy krytycznych urządzeń instalacji, w tym urządzeń które odpowiedzialne są za wymianę ciepła. Badania te mają na celu poprawę sprawności urządzeń instalacji oraz analizę ich trwałości, co ostatecznie wpływa na ograniczenie emisji zanieczyszczeń środowiska, jak również koszty eksploatacyjne. Niestety ogólnie dostępne narzędzia do analizy stanów nieustalonych czynią analizę kosztowną i czasochłonną. Modelowanie nieustalonej pracy tego typu urządzeń uzależnione jest od niskiej wartości kroku czasowego, który wpływa na czas i koszt obliczeń. Klasyczne metody rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych, w których występuje pochodna po czasie, posiadają stabilne rozwiązanie dla określonej wartości kroku czasowego, który dobierany jest dla komponentu o najniższej bezwładności. W niniejszej pracy przedstawiono innowacyjną metodę modelowania stanów nieustalonych, która pozwala na bardzo szybką i tanią analizę nieustalonej pracy wymiennika ciepła. Metoda ta wykorzystuje model matematyczny stanu ustalonego po stronie czynnika o mniejszym strumieniu pojemności cieplnej. Podejście to umożliwia zwiększenie wartości kroku czasowego oraz zachowanie stabilnego rozwiązania w czasie wielokrotnie krótszym niż tradycyjne podejście. Co istotne, ultraszybka metoda modelowania, nie tylko przyspiesza projektowanie i ocenę pracy wymienników ciepła, ale również umożliwia śledzenie ich parametrów pracy w trybie online, co pozwala na bieżącą poprawę sprawności lub wczesne wykrywanie potencjalnego ryzyka awarii. Badania przedstawiają zakres pracy wymiennika ciepła, dla którego metoda uzyskuje bardzo wysoką dokładność. Wyniki badań pokazują, że błąd względny

temperatury czynnika o mniejszej pojemności cieplnej może być mniejszy niż 1%, zapewniając jednocześnie taką samą dokładność rozwiązania po stronie czynnika o wyższej pojemności cieplnej.

Experimental Investigation of R32 and R407C Condensation in Additively Manufactured 316 Stainless Steel Microchannel Heat Exchangers

MATEUSZ KOSTRZEWSKI, WALDEMAR KUCZYŃSKI, KATARZYNA CHLISZCZ

Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
ul. Racławicka 15/17, 75-620 Koszalin
e-mail: mateusz.kostrzewski@s.tu.koszalin.pl
waldemar.kuczynski@tu.koszalin.pl, katarzyna.chliszcz@tu.koszalin.pl

Keywords: zeotropic mixture, condensation, additive manufacturing, microchannel heat exchangers

This paper presents an experimental study of the condensation process of refrigerants R32 (difluoromethane) and R407C, a zeotropic mixture composed of R32 (23% by mass), R125 (pentafluoroethane, 25% by mass), and R134a (1,1,1,2-tetrafluoroethane, 52% by mass), in microchannel heat exchangers fabricated from 316 stainless steel using additive manufacturing techniques. The aim of the study is to evaluate the thermal-hydraulic performance of the printed microchannel structures and to compare the condensation characteristics of a pure refrigerant and a temperature-glide mixture under representative operating conditions. Experiments were conducted over a range of mass fluxes, saturation temperatures, and vapor qualities. Key performance parameters, including local and average heat transfer coefficients, pressure drop, and flow regime transitions, were determined. The results reveal that the additively manufactured surfaces influence condensation behavior through enhanced surface roughness and potential micro-scale features, contributing to improved heat transfer performance. The findings demonstrate the potential of 3D-printed stainless steel microchannel heat exchangers for compact and efficient thermal systems and provide insights for the design and optimization of next-generation refrigeration and air-conditioning equipment.

Thermal Performance Evaluation of Nanofluid-Based Heat Exchangers

DOMINIK BUKSA [1], ELŻBIETA FORNALIK-WAJS [2]
PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY [1], JAN WAJS [3]

[1] The Strata Mechanics Research Institute of the Polish Academy of Sciences
Reymonta 27, 30-059 Cracow, Poland
[2] AGH University of Krakow, Faculty of Energy and Fuels
Department of Fundamental Research in Energy Engineering
Mickiewicza 30, 30-059 Cracow, Poland
[3] Gdansk University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering and Ship Technology, Institute of Energy
Narutowicza 11/12, 80-233 Gdansk, Poland
e-mail: dominik.buksa@imgpan.pl

Keywords: nanofluids; heat exchanger; Mouromtseff number; thermal performance; CFD

The aim of this study is to evaluate the thermal performance of a heat exchanger operating with nanofluids, with particular emphasis on the potential use of the Mouromtseff number or its ratio (Figure of Merit, FOM) as alternative criteria. Classical evaluation methods, e.g. those based on the Nusselt number, do not fully account for the complex influence of changes in thermophysical properties caused by the addition of nanoparticles, which justifies the search for more comprehensive indicators.

In this work, a three-dimensional CFD numerical model was developed to describe convective heat transfer in a shell and tube heat exchanger using CuO–water and Ag–water nanofluids. Both single- and two-phase approaches were considered, taking into account changes in the thermophysical properties of the working fluid as a function of temperature. The effects of the Reynolds number and the volume fraction of the solid phase on the pressure drop, the heat transfer coefficient, and the Nusselt number were analysed.

Thermal performance was evaluated using both: classical parameters (Nusselt number) and extended indices, including the Mouromtseff number and its ratio, which allow for a more comprehensive assessment of the system, taking into account the thermophysical properties of the fluid.

The results obtained indicate a significant increase in the heat transfer rate when using nanofluids compared to that of the base fluid (water), with clear differences observed between CuO and Ag nanofluids. However, the Nusselt number decreases mostly with increased volume fraction of the nanoparticles (CuO and Ag), while the FOM increases (up to ~22% for CuO nanofluids and ~100% for Ag nanofluids). The Mouromtseff number proves to be a useful metric in the analysis of systems utilizing nanofluids, as it accounts for the simultaneous influence of the fluid's thermophysical properties

on thermal and hydrodynamic performance, which is not fully reflected in classical analyses. These findings highlight the potential of nanofluids for heat transfer enhancement in heat exchangers and provide a basis for further optimisation of their performance using more advanced evaluation criteria, especially those which also take into account pressure drop.

Dalsze spostrzeżenia o warunkach powierzchniowej wymiany ciepła dla thermal-FSI oraz ich eksperymentalnych i numerycznych realizacjach

PIOTR JÓZEF ZIÓŁKOWSKI, BARTOSZ KRASZEWSKI, JANUSZ TELEGA
JAROSŁAW KARWACKI, RYSZARD SZWABA, JANUSZ BADUR

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Fiszera 14, 15-351 Gdańsk
e-mail: jb@imp.gda.pl

Słowa kluczowe: thermal-FSI, momentum-FSI, zwiększona wymiana ciepła, powierzchniowy poślizg termiczny, warunek brzegowy Maxwella,

W niniejszym artykule przedstawiamy benchmarkowy eksperyment IMP PAN dotyczący wyboczenia cieplnego sprężystej konstrukcji cienkościennej oraz jego pionierskie pomiary i symulacje numeryczne. Eksperyment ten wykazał na zasadniczą rolę zwiększonej wymiany ciepła obywającą się na powierzchni kontaktu płyn-ciało stałe [1]. Wobec tego zachodzi potrzeba, ponownego modelowania warunków kontaktu strumieni ciepła dla thermal-FSI w warunkach cienkiej, rozrywającej się strugi, dynamicznego kąta zwilżenia, napięcia powierzchniowego w warunkach Maragoniego, wtórnych kropel rozwianych dynamicznie w trakcie termosprężystego przeskoku ścianki.

Przedstawiamy dalsze uzasadnienie warunku brzegowego Maxwella w kontekście pełnego sprzężenia thermal-FSI z momentum-FSI [2]. Dokonujemy dalszej klasyfikacji warunków brzegowych momentum-FSI, mass-FSI w odniesieniu do możliwych sprzężeń. Analizujemy ogólne przeformułowanie modelu thermal-FSI w kontekście termodynamiki port-Hamiltonian prowadzącej do sterowania procesami [3].

Literatura

[1] B Kraszewski, J Badur, J Telega, J Karwacki, R Szwaba, Capturing thermal buckling using coupled Thermal Fluid-Solid Interaction numerical analysis, International Journal of Heat and Mass Transfer 252, 127409 2025

[2] P.J. Ziółkowski, M. Bryk, M. Lemański, P. Madejski, Thermal-FSI of the impact of structural modifications on the stress in a nozzle box made of StE460 steel,13th Wdzydzeanum Conference on Fluid-Solid Interaction,Wdzydze Kiszewskie, 2025

[3] J. Badur, P.J. Ziółkowski, The port-Hamiltonian formulation of thermodynamics – A new Perspectives, Energies, 2026, 44(4) 324, pp.1–38

Eksperymentalna ocena zastosowania ferronanocieczy w chłodzeniu przepływowym elementu elektronicznego

OSKAR KAFKA, GABRIELA BĘBEN-KUCHARSKA
ROBERT MULKA, BARTOSZ ZAJĄCZKOWSKI

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
e-mail: robert.mulka@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: chłodzenie elektroniki, wymiana ciepła, ferronanociecz, rezystancja termiczna, chłodzenie przepływowe

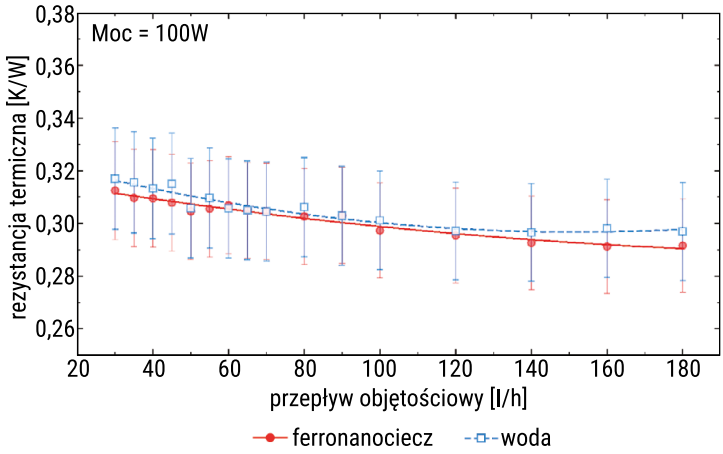
Rosnąca gęstość mocy współczesnych układów elektronicznych powoduje konieczność stosowania wydajniejszych metod odbioru ciepła. Jednym z rozwiązań umożliwiających intensyfikację chłodzenia jest zastosowanie cieczowych układów przepływowych wykorzystujących nanociecze, w tym ferronanociecze, których zmienione właściwości termofizyczne mogą wpływać na efektywność chłodzenia.

Badania miały na celu określenie wpływu rodzaju cieczy, przepływu objętościowego i mocy cieplnej na rezystancję termiczną układu oraz ocenę, czy zastosowanie ferronanocieczy zapewnia efekt większy niż wynikający ze zmiany jej właściwości termofizycznych.

Eksperymenty przeprowadzono na stanowisku do chłodzenia przepływowego elementu elektronicznego, wyposażonym w mikrokanałowy blok cieczowy, pompę, przepływomierz, radiator oraz układ pomiaru temperatury. Badano wodę i ferronanociecz MSG W10 z cząstkami magnetytu (3.4 obj.%) przy przepływach 30–180 l/h i limitach mocy 80–140 W, zmienianych co 20 W.

Uzyskane wyniki (rys. 1.) wskazały, że wzrost natężenia przepływu prowadził do obniżenia rezystancji termicznej dla obu badanych cieczy. Największy spadek rezystancji termicznej obserwowano przy małych i średnich przepływach. Spłaszczenie charakterystyk przy większych przepływach może wynikać z malejącego udziału oporu konwekcyjnego w całkowitej rezystancji cieplnej układu.

Wyniki eksperymentalne porównano z oszacowaniami opartymi na korelacji Dittusa–Boeltera, uwzględniającej liczby Reynoldsa i Prandtla. Pozwoliło to ocenić, czy ferronanociecz wykazuje dodatkowy efekt intensyfikacji wymiany ciepła wykraczający poza wpływ zmian właściwości termofizycznych cieczy. Analiza wskazała, że zmiana właściwości termofizycznych ferronanocieczy może zwiększyć współczynnik przejmowania ciepła maksymalnie o około 2,6%. Dla ferronanocieczy uzyskano nieznacznie niższe wartości rezystancji termicznej niż dla wody, a różnice nie przekraczały kilku procent.



Rys. 1. Zależność rezystancji termicznej od przepływu objętościowego dla wody (niebieskie kwadraty) i ferronanocieczy (czerwone koła) dla mocy cieplnej 100 W

Obserwowane różnice były porównywalne co do rzędu wielkości z efektem oczekiwanym na podstawie zmian właściwości termofizycznych ferronanocieczy. W badanej konfiguracji nie stwierdzono dodatkowego efektu cieplnego, który można byłoby jednoznacznie przypisać lokalnym polom magnetycznym.

Niewielkiej poprawie cieplnej towarzyszyły zwiększone opory przepływu oraz obserwowane osadzanie cząstek w elementach układu. Zastosowanie MSG W10 zapewniało niewielką korzyść cieplną, którą należy rozpatrywać łącznie z większym zapotrzebowaniem na moc pompy i tendencją do osadzania cząstek.

Experimental Assessment of Mass Transfer Process in Marine Ejector Scrubbers

JERZY GAGAN[1], KAMIL ŚMIERCIEW[1], DARIUSZ BUTRYMOWICZ[1]
MICHAŁ ŁUKASZUK[1], PAWEŁ JAKOŃCZUK[1], ADAM DUDAR[1]
MATEUSZ KĘDZIERSKI[2],TADEUSZ ZIELIŃSKI[3]

[1]Bialystok University of Technology,
Wiejska 45C, Białystok, 15-351, Poland
[2]Gdansk University of Technology
Narutowicza 11/12, 80-233 Gdansk, Poland
[3]Marine Project Ltd.,
Sienna 45, Gdansk, 80-605, Poland
e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Keywords: ejector-based scrubber; two-phase mixing; SOx emission control; exhaust gas treatment; marine decarbonisation

Marine ejector scrubbers represent a compact alternative to conventional exhaust gas cleaning systems; however, the mechanisms governing their operation and mass transfer performance remain insufficiently understood. This paper presents an experimental investigation of the operating characteristics and mass transfer process in a jet-ejector scrubber developed for marine flue gas desulphurisation.

The study combined laboratory-scale investigations using a 40 kW diesel engine with full-scale validation on a 250 kW marine engine. Laboratory experiments performed with nozzles of different throat diameters included pressure measurements along the mixing chamber and determination of entrainment ratio characteristics under various operating conditions. The results revealed distinct operating regimes of the ejector scrubber and demonstrated that high entrainment ratios alone do not ensure effective SO_2 removal. Efficient desulphurisation was achieved only when a mixing shock wave was formed within the mixing chamber, resulting in compression of the gas-liquid mixture. The pressure distributions and entrainment ratio characteristics clearly illustrate the transition between these operating regimes and identify the conditions required for efficient scrubber operation.

The full-scale prototype consistently reduced inlet SO_2 concentrations to nearly zero over the investigated engine operating range. Based on 1,549 experimental data points, the mass transfer process was characterised using the corresponding mass transfer coefficient, and a Sherwood number correlation was developed as a function of the Reynolds, Weber and Schmidt numbers together with the geometric module and compression ratio.

The proposed correlation showed excellent agreement with experimental data ($R^2 = 0.968$) and provides a practical tool for the design and optimisation of compact ejector-based exhaust gas cleaning systems for marine applications.

ROZDZIAŁ 10
SYSTEMY ENERGETYCZNE, OZE I MAGAZYNOWANIE ENERGII

Modelling thermodynamic processes in salt caverns for hydrogen storage

MAGDALENA SZYMKIEWICZ, TOMASZ SOBOTA
Cracow University of Technology, Faculty of Environmental Engineering and Energy
24, Warszawska Street, 31-155 Cracow, Poland
e-mail: m.szymkiewicz@pk.edu.pl

Keywords: underground hydrogen storage; salt cavern; thermodynamic modelling; non-isothermal behaviour; cavern-rock heat transfer; cavern integrity;

Power systems with increasing shares of variable renewable generation require large-scale, long-duration storage solutions. Underground gas storage in salt caverns is attractive because rock salt combines very low permeability with favourable long-term mechanical behaviour. However, cyclic cavern operation-hydrogen injection, shut-in storage and withdrawal-induces intense transient pressure and temperature variations and sustained heat exchange with the surrounding formation, which jointly influence deliverability, efficiency and integrity margins.

This paper develops a Python-based numerical model for salt-cavern hydrogen storage that represents the coupled thermo-fluid behaviour of the storage cycle. The formulation resolves mass and energy balances in the cavern with time-dependent operating pressure, includes non-isothermal gas behaviour and wall heat transfer, and models heat conduction in the host rock to capture short- and long-term thermal transients. In addition, the model incorporates integrity-related effects relevant to long-term operation, represented by potential gas-loss terms and the evolution of selected rock-mass parameters that affect tightness and stability.

The model outputs transient pressure and temperature changes, along with performance indicators (e.g., working gas, deliverability proxies, and loss estimates), enabling a quantitative assessment of safe operating envelopes and the long-term viability of salt caverns as hydrogen storage facilities.

Symulacje numeryczne pracy zdecentralizowanego urządzenia wentylacji fasadowej z wykorzystaniem wymienników z materiałem zmiennofazowym

BEATA GALISZEWSKA

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geodezji i Energetyki Odnawialnej
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce
e-mail: bgaliszewska@tu.kielce.pl

Słowa kluczowe: zdecentralizowana wentylacja fasadowa, symulacje numeryczne, materiały zmiennofazowe (PCM), odzysk ciepła

Wentylacja fasadowa stanowi istotną alternatywę dla tradycyjnych systemów wentylacji w budynkach, w których występują ograniczenia stosowania wentylacji naturalnej oraz trudności w implementacji centralnych układów wentylacyjnych. Dotyczy to w szczególności obiektów modernizowanych oraz budynków o zwartej zabudowie, gdzie lokalne, zdecentralizowane rozwiązania mogą stanowić efektywny sposób zapewnienia wymiany powietrza przy jednoczesnym ograniczeniu strat energii.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznych pracy zdecentralizowanego urządzenia wentylacji fasadowej wyposażonego w wymiennik ciepła wypełniony różnymi materiałami zmiennofazowymi (PCM). Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem programu Ansys Fluent w oparciu o dane pochodzące z badań eksperymentalnych realizowanych w warunkach laboratoryjnych. W badaniach tych wyznaczono sprawność wymiany ciepła zarówno dla całego urządzenia, jak i dla samych wymienników.

Opracowano dwa modele symulacyjne 3D stanu nieustalonego. W pierwszym podejściu (metoda A) materiał wypełniający wymiennik został odwzorowany bezpośrednio w modelu numerycznym poprzez implementację jego właściwości fizycznych, z uwzględnieniem ciepła przemiany fazowej. Drugie podejście (metoda B) oparto na zastosowaniu zewnętrznego skryptu UDF, definiującego zmienną w czasie temperaturę ścianek cylindrycznych elementów wymiennika, z uwzględnieniem akumulacji energii w materiale PCM.

W pracy przedstawiono koncepcję modelowania numerycznego, przyjęte warunki brzegowe oraz sposób przygotowania geometrii i siatki obliczeniowej. Analiza obejmuje odwzorowanie cyklicznej pracy urządzenia w trybie nawiew–wywiew oraz wpływu zastosowanego wypełnienia na przebieg wymiany ciepła. Wyniki symulacji zestawiono z rezultatami badań eksperymentalnych, co umożliwiło ocenę poprawności przyjętych założeń modelowych oraz analizę różnic pomiędzy poszczególnymi wariantami wymienników.

Przedstawione podejście stanowi podstawę do dalszych analiz numerycznych zdecentralizowanych systemów wentylacji z odzyskiem ciepła z wykorzystaniem materiałów zmiennofazowych.

Efektywność integracji rozproszonych źródeł energii z niskotemperaturową siecią ciepłowniczą w procesie transformacji energetycznej osiedli mieszkalnych

DAMIAN ŁADNY, DOROTA CHWIEDUK
Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa
e-mail: damian.ladny.dokt@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: niskotemperaturowe sieci ciepłownicze, pompa ciepła, fotowoltaika, magazynowanie energii, zapotrzebowanie na energię w budynku

Artykuł prezentuje wyniki analizy efektywności integracji rozproszonych źródeł energii z niskotemperaturową siecią ciepłowniczą w kontekście zaopatrzenia w ciepło osiedla budynków wielorodzinnych. Przeprowadzone badania wpisują się w koncepcję nowoczesnego ciepłownictwa systemowego, opartego na obniżonej temperaturze czynnika grzewczego, wysokiej efektywności energetycznej oraz zdolności do współpracy systemu ciepłowniczego z odnawialnymi źródłami energii i magazynami energii.

Studium przypadku dotyczyło osiedla zlokalizowanego w województwie lubelskim, obejmującego 11 budynków wielorodzinnych. Dla analizowanego obszaru określono zapotrzebowanie na energię cieplną na potrzeby ogrzewania oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej, a także przeanalizowano możliwości zastosowania pomp ciepła typu booster, magazynów ciepła oraz instalacji fotowoltaicznych. Celem było określenie potencjału współpracy tych elementów w ramach lokalnego systemu ciepłowniczego o obniżonych parametrach pracy.

W ramach pracy porównano dwa warianty systemu zaopatrzenia w ciepło. Wariant I zakładał wykorzystanie wysokotemperaturowych instalacji odbiorczych w budynkach, natomiast wariant II opierał się na zastosowaniu instalacji niskotemperaturowych, umożliwiających bardziej efektywną pracę pomp ciepła oraz zwiększenie stopnia wykorzystania magazynów ciepła i energii elektrycznej pochodzącej z instalacji fotowoltaicznych. Dla obu wariantów przeprowadzono szczegółowe analizy energetyczne oraz ekonomiczne. Aby uwzględnić charakterystykę wytwarzania energii z pogodozależnych źródeł OZE oraz ich współpracę z niskotemperaturową siecią ciepłowniczą, analizy energetyczne zostały przeprowadzone z godzinowym krokiem czasowym.

Kluczowym wskaźnikiem oceny efektywności ekonomicznej był wskaźnik LCOH (Levelized Cost of Heat), uwzględniający koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, współczynnik wydajności grzewczej pomp ciepła oraz ceny energii elektrycznej i ciepła dostarczanego z sieci niskotemperaturowej. Uzyskane wyniki wskazują, że systemy oparte

na niskotemperaturowych instalacjach odbiorczych, wspomagane energią z instalacji fotowoltaicznych oraz wykorzystaniu niskich cen energii elektrycznej z RDN (Rynek Dnia Następnego), pozwalają na istotne obniżenie wartości LCOH, osiągając konkurencyjne koszty produkcji ciepła w porównaniu z rozwiązaniami konwencjonalnymi.

Hybrid Energy Storage System Using Post-Mining Infrastructure (HESS)

ALEKSANDER ROŻEK
Politechnika Śląska, Wydział Inzynierii Środowiska i Energetyki
ul. Stanisława Konarskiego 18, 44-100 Gliwice
e-mail: aleksander.rozek@polsl.pl

Keywords: Energy Storage, Efficiency, CAES, TES, Hybrid Energy Storage System

A hybrid energy storage system (HESS) coalesces multiple energy storage methods into a single module. The fundamental objective of the system is the strengthening of energy system security. Ongoing decarbonisation processes, which include the progressive decommissioning of collieries, present an opportunity to repurpose existing underground infrastructure for novel applications.

The HESS project proposes to leverage the existing excavation framework rather than undertake subsurface infilling. This system integrates pumped storage hydroelectricity, compressed air energy storage (CAES), and thermal energy storage (TES). These are coordinated with an energy router that optimises energy flows and manages exchanges with the national power grid. This architecture also enables cooperation between distributed HESS units.

For this analysis, three CAES-TES configurations were evaluated. The first was a standard adiabatic CAES setup, which involved passing the compressed air through a thermal energy storage as shown in Fig. 1. This enabled the absorption of heat generated during compression, allowing for the storage of a larger mass of air. Furthermore, this arrangement facilitates the heating of air during the discharging phase, which increases the discharge enthalpy.

The remaining configurations consisted of variations in the compressor setup, utilising 2 and 3 compressors and 1 and 2 interstage coolers respectively. The heat exchanged at the interstage coolers was managed by the energy router. At the same time, this decreased the amount of heat accumulated within the TES.

The results showed that the first system had the highest energy efficiency (circa 70%), while the remaining two had a lower efficiency of circa 63%.

Although less efficient, multi-compressor configurations can be constructed from cheaper materials due to lower operating temperatures, which reduces cost.

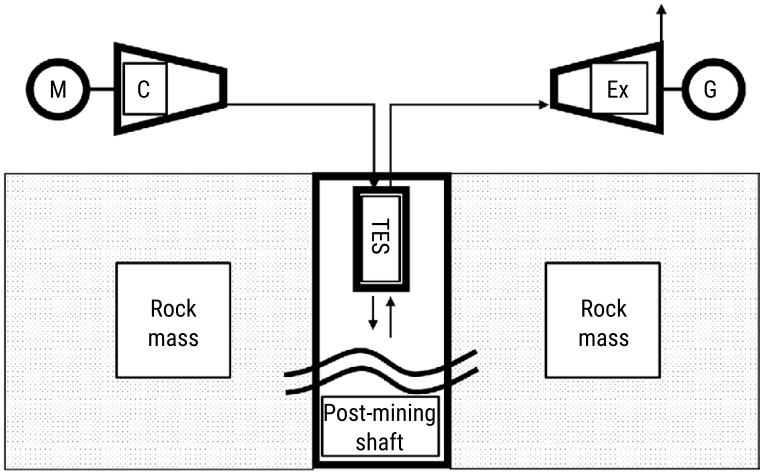


Fig. 1 ACEAS system

Additionally, a closed-loop CO_2 system was analysed, demonstrating potential efficiencies of up to 80% under favourable operating conditions.

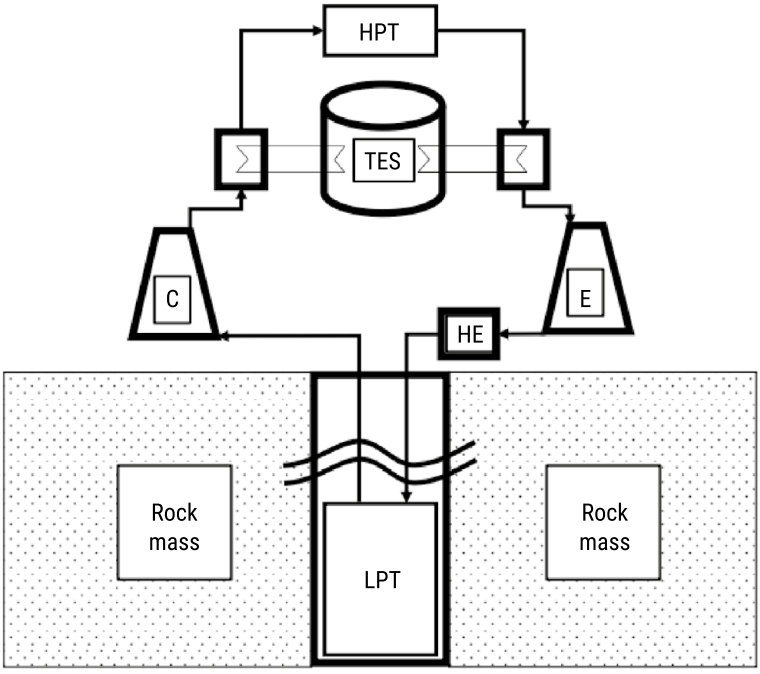


Fig. 2 CCES system

The results highlight the trade-off between efficiency, material requirements, and economic feasibility, supporting the potential of repurposed underground infrastructure as a viable platform for hybrid energy storage deployment.

Analiza wpływu temperatury dolnego źródła ciepła na parametry pracy powietrznej pompy ciepła

ARTUR KLONOWSKI, MAŁGORZATA SIKORA
Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
ul. Racławicka 15-17, 75-620 Koszalin
e-mail: malgorzata.sikora@tu.koszalin.pl

Słowa kluczowe: powietrzna pompa ciepła, COP, dolne źródło ciepła,

W artykule przeanalizowano wpływ temperatury dolnego źródła ciepła na parametry pracy powietrznej pompy ciepła. Badania przeprowadzono na podstawie wyników pomiarów eksperymentalnych zarejestrowanych podczas pracy urządzenia w szerokim zakresie temperatur powietrza zewnętrznego. Analizie poddano kluczowe wielkości eksploatacyjne, w tym moc grzewczą, pobór mocy elektrycznej sprężarki, współczynnik wydajności grzewczej COP oraz zmiany parametrów termodynamicznych czynnika roboczego w obiegu. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na istotny spadek efektywności energetycznej pompy ciepła wraz z obniżaniem temperatury dolnego źródła, co objawia się zmniejszeniem wartości COP oraz wzrostem jednostkowego zużycia energii elektrycznej. Jednocześnie zaobserwowano pogorszenie warunków pracy sprężarki oraz ograniczenie dostępnej mocy grzewczej przy niskich temperaturach powietrza. Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano wnioski dotyczące zakresów efektywnej eksploatacji powietrznych pomp ciepła oraz znaczenia temperatury dolnego źródła w procesie doboru i oceny pracy tego typu urządzeń grzewczych.

Analiza numeryczna wpływu temperatury na efektywność procesu ciśnieniowo-powstrzymywanej osmozy

JULIUSZ WACHNICKI, PIOTR ŁAPKA

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Zakład Termodynamiki
ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa
e-mail: juliusz.wachnicki.dokt@pw.edu.pl, piotr.lapka@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: Ciśnieniowo-powstrzymywana osmoza (PRO), Wpływ temperatury, Strumień soli, Strumień wody, Strumień ciepła

Niniejszy artykuł przedstawia analizę numeryczną transportu wody oraz soli w laboratoryjnym module do prowadzenia procesu ciśnieniowo-powstrzymywanej osmozy (pressure-retarded osmosis, PRO), rozszerzoną o wpływ temperatury roztworów ubogiego (feed) i bogatego (draw) oraz wpływ wymiany ciepła między roztworami przez półprzepuszczalną membranę. W analizach wykorzystano roztwór wodny chlorku sodu (NaCl). Symulacje przeprowadzono dla zakresu temperatur 20–40°C w obu strumieniach roztworów, przy zachowaniu podejścia, w którym właściwości fizykochemiczne roztworów są funkcją jednocześnie stężenia i temperatury. Zmiana temperatury wpływa na proces PRO poprzez sprzężone oddziaływanie zjawisk transportowych i właściwości termofizycznych roztworów. Wzrost temperatury powoduje obniżenie lepkości dynamicznej roztworów, co redukuje opory przepływu i intensyfikuje transport konwekcyjny w kanałach przepływowych. Jednocześnie rośnie współczynnik dyfuzji soli, co osłabia zjawiska polaryzacji stężeniowej zarówno zewnętrznej, jak i wewnętrznej w strukturze membrany. Zmiany temperatury modyfikują także gęstość i współczynnik aktywności jonów, wpływając na efektywne ciśnienie osmotyczne oraz lokalne gradienty potencjału chemicznego odpowiedzialne za strumień wody przechodzące przez półprzepuszczalną membranę. W modelu numerycznym zależności właściwości roztworów od temperatury i udziału masowego soli uwzględniono poprzez sprzężone równania transportu masy i pędu, rozwiązane dla zmiennych warunków termicznych i stężeniowych po obu stronach membrany. Analiza prowadzona była dla różnych prędkości przepływu, co umożliwiło ocenę współdziałania efektów hydrodynamicznych, transportu masy i termicznych w kształtowaniu strumienia wody na membranie oraz gęstości mocy uzyskiwanej w module PRO. Wprowadzenie podwyższonej temperatury roztworów prowadzi ogólnie do poprawy efektywności procesu PRO. Wynika to z jednoczesnego zwiększenia mobilności molekuł soli, redukcji oporów transportu oraz wzmocnienia siły napędowej procesu. Wpływ temperatury ujawnia się zarówno poprzez bezpośrednie oddziaływanie na właściwości roztworów, jak i poprzez modyfikację lokalnych warunków transportu soli i wody w obrębie struktury membrany.

Integration of a heat pump with a fireplace in a combined system serving two residential buildings – the impact of modernization on the operation of a non-standard system

STANISŁAW DOKOWSKI, KATARZYNA ZWARYCZ-MAKLES
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
al. Piastów 50 70-311 Szczecin
e-mail: stanislaw.dokowski@zut.edu.pl

Keywords: hybrid heating system, water-jacketed fireplace, heat pump, optimization

This paper presents an analysis of the operation of the combined heating systems serving two residential buildings located in the West Pomeranian Voivodeship, Poland. Buildings are jointly supplied by two heat sources: a split-type air-source heat pump and a water-jacketed fireplace. The system was modernized to improve the efficiency of the interaction between these sources. Main challenge was the lack of communication between the controllers of the two sources. As part of the modernization, an attempt was made to solve this problem without the need for excavation work – the system topology was changed, extra heating circulation pumps and solenoid valves were installed, and the control logic was modified.

Subsequently, a detailed measurement system was implemented, and over the course of several months, measurements were conducted to assess the sources' ability to work together and to identify an optimal strategy. The pumps' capability to measure the transferred heat flux and other parameters (i.e. volume flow rate, pressure), as well as their ability to communicate using the Modbus TCP protocol, was utilized. In addition, a series of Pt100 temperature sensors was installed to monitor temperatures at key points in the individual system circuits. Data was transmitted using a simple web server integrated into the controller used for measurements and a GSM router. The authors gained real-time insight into the system's status and the ability to analyze historical data. They assessed the effectiveness of the interaction between the fireplace's water jacket and the air-source heat pump, as well as the impact of control parameters on the system's operating temperatures and user comfort.

The measurements allowed for the diagnosis of system malfunctions reported by users, and the findings were used to adjust the control system settings. The fireplace was the users' preferred heat source due to the availability of fuel. The benefits of the actions taken were subsequently observed in the incoming data and were confirmed by improved user comfort. They also allowed conclusions to be drawn regarding further optimization measures that could be implemented. Data collection is still ongoing.

Metodyka eksperymentalnego wyznaczania równowagowego ciśnienia pary wodnej hydratów soli nieorganicznych

MATEUSZ MŁYNARCZYK, ŁUKASZ CIEŚLIKIEWICZ
PIOTR FURMAŃSKI, PIOTR ŁAPKA

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa
e-mail: piotr.lapka@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: ciśnienie równowagowe, termochemiczny magazyn energii, hydrat soli, para wodna

Termochemiczne magazyny ciepła są jedną z najbardziej perspektywicznych technologii, które mogą wspomóc dekarbonizację sektora energetycznego. Technologia ta polega na akumulacji energii w postaci potencjału chemicznego materiałów termochemicznych. Procesy ładowania i rozładowania zachodzą z wykorzystaniem odwracalnych reakcji chemicznych, którym towarzyszą efekty cieplne. Magazyny termochemiczne charakteryzują się wysoką gęstością magazynowanej energii oraz możliwością długoterminowego przechowywania bez strat cieplnych. Obiecującym kandydatem na materiał termochemiczny dla niskotemperaturowych magazynów ciepła do zastosowań w budownictwie są hydraty soli nieorganicznych. Kluczowym parametrem opisującym warunki pracy w tego typu układach jest równowagowe ciśnienie pary wodnej, które determinuje kierunek procesów hydratacji i dehydratacji. Jego wartość zależy od temperatury i może być opisana teoretycznie przy pomocy równania Clausiusa-Clapeyrona. W warunkach rzeczywistych na przebieg reakcji wpływają również zjawiska związane z metastabilnością hydratów soli, efekty mikrostrukturalne oraz ograniczenia transportu masy, co uzasadnia konieczność weryfikacji eksperymentalnej.

Celem pracy było opracowanie oraz walidacja metody wyznaczania równowagowego ciśnienia pary wodnej nad hydratami soli na podstawie bezpośredniego pomiaru ciśnienia absolutnego w warunkach próżniowych. Procedura pomiarowa obejmowała etap stworzenia próżni w naczyniu pomiarowym, stabilizacji temperatury oraz rejestracji zmian ciśnienia w funkcji temperatury w przedziale 35–70°C.

Metodę zastosowano do analizy odwracalnej reakcji $MgCl_2 \cdot 6H_2O \leftrightarrow MgCl_2 \cdot 4H_2O + 2H_2O$. Badania przeprowadzono dla czterech niezależnych próbek w celu oceny powtarzalności wyników oraz wiarygodności zaproponowanej metodyki. Uzyskane charakterystyki równowagowe wykazują wysoką zgodność pomiędzy seriami pomiarowymi oraz dobrą korelację z danymi literaturowymi. Otrzymane wyniki potwierdzają działanie opracowanego stanowiska do badań właściwości termodynamicznych materiałów przeznaczonych do termochemicznego magazynowania energii oraz stanowią podstawę do dalszych analiz.

Badania eksperymentalne charakterystyk pracy generatorów termoelektrycznych ze źródłami ciepła w postaci pianek metalowych nasyconych materiałem zmiennofazowym

PAWEŁ SZOSTAK, JERZY BANASZEK
MIROSŁAW SEREDYŃSKI, MACIEJ JAWORSKI
Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa
e-mail: maciej.jaworski@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: materiał zmiennofazowy, pianki metalowe, generator termoelektryczny, chłodzenie elektroniki

Materiały zmiennofazowe (ang. *phase change material*, PCM) charakteryzują się wysoką pojemnością cieplną w wąskim zakresie zmian temperatury. Dzięki tej właściwości są one wykorzystywane w układach akumulacji ciepła i chłodu. Z drugiej strony, zdolność do akumulacji i uwalniania dużych ilości ciepła przy niewielkich zmianach temperatury sprawia, że materiały te mogą pełnić rolę stabilizatorów temperatury, jak również mediów aktywnych w układach chłodzenia, np. elementów elektronicznych pracujących cyklicznie lub w warunkach dużej zmienności obciążeń cieplnych. Interesującym zastosowaniem materiałów PCM są generatory termoelektryczne (TEG), w których wykorzystuje się źródła ciepła o zmiennych w czasie parametrach, np. generatory na stacjach kosmicznych operujących na orbicie Ziemi, z cyklicznie pojawiającym się źródłem ciepła w postaci promieniowania słonecznego.

Efektywność działania układów wykorzystującym materiały PCM zależy od intensywności transportu ciepła między tymi materiałami a otoczeniem, która jest jednak ograniczona bardzo niską przewodnością cieplną PCM. Spośród różnych technik intensyfikacji transportu ciepła w układach z PCM, bardzo dobre efekty uzyskuje się przez zastosowanie pianek metalowych o dużej porowatości jako zasobników materiału zmiennofazowego. Osnowa metalowa zapewnia dobry transport ciepła do całej objętości PCM, a duża porowatość sprawia, że pojemność cieplna układu jest tylko nieznacznie obniżona.

W pracy przedstawione zostaną wyniki badań eksperymentalnych charakterystyk pracy generatora termoelektrycznego, w którym źródłem ciepła jest zestalający się materiał zmiennofazowy wypełniający pory pianki metalowej. Na potrzeby badań zaprojektowano i wykonano stanowisko pozwalające na badania procesów transportu ciepła w kompozytach pianka metalowa – materiał PCM. Szczegółowym przedmiotem badań jest określenie wpływu na efektywność działania generatora TEG takich parametrów, jak: porowatość pianki metalowej, wielkość porów (*pores per inch*, PPI), materiał

pianki (miedź i nikiel) wielkość zasobnika ciepła. Rozważa się także badania konfiguracji z dwoma materiałami PCM o różnych temperaturach przemiany fazowej, z których jeden jest źródłem ciepła (w procesie zestalania), a drugi pochłania ciepło po „zimnej" stronie TEG (w procesie topnienia).

Prowadzone badania mają charakter aplikacyjny, ale istotne jest również ich znaczenie poznawcze, także w kontekście walidacji modeli teoretycznych stosowanych w analizie procesów transportu ciepła w kompozytach pianka metalowa – PCM.

Zastosowanie zawiesiny lodowej w układzie chłodzenia powietrza kopalni – case study

ŁUKASZ MIKA, KAROL SZTEKLER, AGATA MLONKA-MĘDRALA, EWELINA RADOMSKA, WOJCIECH NOWAK ANDRZEJ GOŁDASZ, TOMASZ BUJOK, PIOTR BORUTA

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: lmika@agh.edu.pl

Słowa kluczowe: zawiesina lodowa, materiał zmiennofazowy (PCM), ciecz nienewtonowska, systemy chłodzenia

Praca poświęcona jest problemowi rosnących temperatur w wyrobiskach górniczych oraz pokonaniu ograniczeń tradycyjnych systemów chłodzenia opartych o wodę lodową. Wraz ze zwiększaniem długości podziemnych rurociągów transportujących „chłód" do rejonów wydobywczych rosną straty ciepła, a temperatura wody na wejściu do chłodnic znacząco wzrasta. Powoduje to obniżenie efektywności chłodnic i utrudnia utrzymanie wymaganych temperatur powietrza w miejscu pracy. Dotychczasowe metody zwiększenia wydajności wymagały kosztownej przebudowy instalacji lub budowy nowych szybów.

Autorzy przedstawiają alternatywę: zastąpienie wody lodowej tzw. zawiesiną lodową (slurry ice), będącą mieszaniną wody i cząstek lodu o wymiarach do 5 mm. Dzięki wykorzystaniu ciepła przemiany fazowej medium to ma znacznie większą zdolność akumulacji chłodu i może utrzymywać stałą temperaturę ok. 0°C na dużych odległościach od źródła „chłodu". Takie rozwiązanie zostało wdrożone kilka lat temu podczas modernizacji systemu chłodzenia kopalni LW Bogdanka S.A „Pole Stefanów". We współpracy z naukowcami z AGH powstał pierwszy na świecie centralny system chłodzenia powietrza w kopalni pracujący w obiegu zamkniętym z użyciem zawiesiny lodowej (zamiast wody) stanowiący implementację wyników oryginalnych prac naukowych w zakresie jej właściwości cieplnych i przepływowych.

W ramach modernizacji układu chłodzenia pozostawiono całą istniejącą infrastrukturę i rurociągi transportowe, dodając jedynie instalację do produkcji drobinek lodu. Taka instalacja składa się z generatora drobinek lodu, koncentratora lodu, mieszalnika, chillera amoniakalnego wraz z osprzętem oraz układu filtracji wody. W wyniku wymieszania cząstek lodu z wodą schłodzoną uzyskuje się mieszaninę o temperaturze ok. 0°C, która trafia do rurociągu szybowego i dalej do chłodnic powietrza. Dzięki obecności cząstek lodu temperatura mieszaniny na dopływie do odległych chłodnic jest również bardzo niska.

Modernizacja zwiększyła moc chłodniczą systemu z 6 do ponad 9 MW, bez konieczności wymiany rurociągów. W rejonach odległych od szybu temperatura medium spadła z 8–12°C do 0–2°C, co pozwoliło obniżyć temperaturę powietrza w wyrobiskach nawet

o 6°C. Choć system cechuje się wyższymi kosztami inwestycyjnymi, jego efektywność chłodnicza w dużych instalacjach jest znacznie wyższa niż systemów wodnych. Przykład Bogdanki pokazuje, że zawiesina lodowa może być skutecznym rozwiązaniem wszędzie tam, gdzie tradycyjne systemy osiągnęły granice możliwości technicznych.

The impact of energy storage and electric vehicle charging on self-consumption of energy from a photovoltaic system in a single-family home

ARTUR CEBULA, GABRIELA STACHURA-GAŁGAN, MONIKA PIWOWARCZYK

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Katedra Energetyki
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: g.stachura@doktorant.pk.edu.pl

Keywords: photovoltaic system, energy storage, self-consumption, electromobility, economic analysis

Growing public awareness related to environmental protection, the implementation of energy transition goals, and the need to reduce greenhouse gas emissions contribute to the development of renewable energy sources in the prosumer sector. Photovoltaic systems and electromobility in households are of particular importance. However, an important limitation of such systems is the temporal mismatch between energy generation from the PV system and the users' demand profile, which leads to surplus energy being fed into the grid. One way to reduce this phenomenon is to use a household energy storage system.

The aim of this study is to conduct a comparative energy and economic analysis of a household energy storage system in a statistical 2+2 household equipped with a photovoltaic system and an electric vehicle charger. The analysis was performed using two simulation approaches. The first approach involved a 10 kW PV system model developed in the TRNSYS environment, the results of which were imported into MATLAB in order to reproduce the operation of the energy storage system. The second approach was carried out in Polysun, where an analogous system was modelled, including the PV system, household electricity consumption, electric vehicle charging, and the energy storage system.

In both analyses, the same input data were adopted, including the system location, meteorological data, PV system parameters, hourly energy demand profile, and the method of electric vehicle use. It was assumed that on working days the vehicle travels 30 km per day and is charged for two hours per day.

The comparison included PV energy production, the level of self-consumption, the amount of energy imported from and exported to the grid, the operation of the energy storage system, and selected economic indicators. The results indicate a favourable energy-related effect of using an energy storage system; however, they do not confirm its economic profitability under the adopted investment costs and energy prices.

Zastosowanie zasobnika ciepła do wspomagania produkcji pary technologicznej w przemyśle chemicznym

TOMASZ SIMLA
Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
e-mail: tsimla@polsl.pl

Słowa kluczowe: oszczędność energii, para technologiczna, przemysł chemiczny, zasobnik ciepła

Wykorzystanie pary technologicznej w przemyśle chemicznym charakteryzuje się dużą nierównomiernością poboru. Układ zaopatrzenia w parę musi sprostać tym wymaganiom, co niejednokrotnie wymusza nieoptymalną pracę kotłów, przykładowo pracę dwóch kotłów zamiast jednego aby tylko pokryć krótkotrwały szczyt zapotrzebowania. Zastosowanie zasobnika ciepła pozwoliłoby na wygładzenie profilu zapotrzebowania na produkcję pary przez kotły, potencjalnie prowadząc do oszczędności energii. Produkcja pary wymaga jednak odpowiedniego poziomu temperatury w zasobniku. Wymagania te można spełnić stosując materiał zmiennofazowy i ciepło utajone przemiany fazowej. Dobór metalu lub stopu metali krzepnącego w odpowiedniej temperaturze umożliwiłby produkcję pary o wymaganych parametrach. Zasobnik taki mógłby również pełnić funkcję zapasowego źródła ciepła na wypadek awarii kotłów.

W niniejszej pracy zbadano efekty energetyczne integracji zasobników ciepła w ciekłym metalu (pojemność pojedynczego zasobnika 400 kWh) z obiegiem parowym oraz potencjalne oszczędności energii na przykładzie wybranego zakładu przemysłowego. Z jednej strony obecność bufora energii pozwala na optymalizację pracy kotłów prowadzącą do zwiększenia ich średniej sprawności energetycznej, jednak z drugiej strony zasobnik ciepła stanowi dodatkowe źródło strat ciepła do otoczenia. Na podstawie rzeczywistych danych o zapotrzebowaniu na parę w rozdzielczości godzinowej przygotowano model symulacyjny pracy układu zaopatrzenia w parę opartego o kotły węglowe rusztowe. Przeprowadzono symulację pracy układu rozbudowanego o zasobniki ciepła. Porównano zużycie węgla w wariantach bez zasobnika i z zasobnikiem. W celu określenia optymalnej wielkości magazynu energii zbadano warianty z różną liczbą zasobników ciepła.

Computational and experimental study of charging and discharging proces of a heat storage unit with phase change material

DANIEL SMYKOWSKI, BEATA PYTLIK, TOMASZ TIETZE, PIOTR SZULC

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katadra Inżynierii Konwersji Energii
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50–370 Wrocław
e-mail: piotr.szulc@pwr.edu.pl

Keywords: thermal energy storage, phase change material, numerical modelling, experimental study, model validation

Global energy demand has shown a sustained upward trend for many years. According to publications [1,2], heat accounts for nearly half of total primary energy consumption and is responsible for 38% of CO_2 emissions in the energy sector (2022). Heat generated from renewable sources represented only 13% of the total heat production volume in 2022. The main factor limiting the rapid increase of renewable energy sources in the energy mix is their variable operating characteristics and lack of controllability.

Thermal energy storage may therefore constitute a significant alternative to expensive electrical energy storage systems, which are additionally characterized by limited durability. The most commonly used material for heat storage is water. However, the use of water as a heat storage medium is limited to temperatures below 100°C, and its heat storage density is moderate. An alternative to water are phase change materials (PCMs), which, within the phase transition temperature range, are capable of accumulating several times more heat than water. Moreover, their properties, such as phase transition temperature and latent heat, can be widely tuned to expected operating conditions and applications. Their main disadvantage, however, is low thermal conductivity, which requires the use of specific structural solutions in the design of thermal storage systems. Numerical modeling methods are a useful tool in designing optimal storage configurations, as they allow to reduce the experimental studies.

In this study, the Authors focused on the development of an original numerical model of a thermal energy storage unit and on simulating the charging and discharging processes. The novelty of the developed model lies in the implementation of PCM material properties obtained from DSC–TGA measurements. The simulation results were subsequently validated against measurements conducted on a laboratory test stand specifically constructed for this purpose and equipped with a thermal energy storage unit.

It was demonstrated that the developed numerical model accurately reproduces the heat transfer between the heat transfer fluid (air), the heat exchange system consisting of a finned tube, and the PCM, accumulating thermal energy. In the case of the PCM

temperature and the heat transfer fluid temperature, the deviation between simulated and measured values did not exceed 5%, while for charging and discharging time, the deviation ranged between 5% and 7%.

Application of Molten Salt Thermal Energy Storage as an Example of Decarbonization of Polish Combined Heat and Power Plants

KACPER SZTURGULEWSKI, KAMIL STASIAK, DARIUSZ MIKIELEWICZ

Politechnika Gdańska, Wydział Inzynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: kacper.szturgulewski@pg.edu.pl

Keywords: thermal energy storage, molten salt storage, decarbonization, CHP plant retrofitting, energy system modelling

Power plants, and in particular combined heat and power (CHP) plants, constitute optimal locations for the implementation of energy storage technologies. Their current position within the power system ensures existing grid connection capacities, while the facilities themselves act as natural network nodes enabling both the intake and delivery of significant amounts of electricity. They are also equipped with developed infrastructure and established operational procedures, which facilitates the integration of new technological solutions.

These conditions enable the transformation of conventional units into modern hybrid energy storage hubs. However, to operate in a manner comparable to a conventional power plant, an energy storage system must deliver a wide range of services – from fast response to grid imbalances to providing substantial storage capacity and enabling daily energy retention. No single storage technology can meet all these requirements simultaneously; therefore, hybrid solutions combining different storage technologies are of increasing importance.

The presented approach follows a European concept of transforming conventional power plants into hybrid energy hubs supporting power system stability under high shares of renewable energy sources through the integration of multiple storage technologies, including thermal, battery and mechanical storage systems.

In this study, a conventional CHP plant is analysed within such a hybrid framework, with the focus placed on the thermal energy storage subsystem. Specifically, the coal-fired boiler is replaced by a molten salt thermal energy storage unit serving as the primary heat source for the steam cycle. The system performance is evaluated under steady-state conditions over a wide range of partial load operation using the commercial simulation software Ebsilon Professional.

Sprzężony model chłodni przechowalniczej o parametrach skupionych i rozłożonych (0D–1D) z bilansem powietrza wilgotnego, transportem w złożu i weryfikacją pomiarową

DARIUSZ KARDAŚ, GRZEGORZ MIZERA
Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk
ul. Fiszera 14, 80-231 Gdańsk
e-mail:dk@imp.gda.pl

Słowa kluczowe: chłodnia przechowalnicza; powietrze wilgotne; model wieloskalowy; weryfikacja pomiarowa

Przedstawiono niestacjonarny model numeryczny chłodni owoców i warzyw oparty na równaniach bilansowych masy, energii i pędu dla całego obiegu powietrza. Układ opisano jako sieć elementów o parametrach skupionych (wentylator, chłodnica powietrza, kanały, trójnik rozdzielający i komora mieszania) sprzężoną z jednowymiarowym modelem złoża produktów zorientowanym wzdłuż kierunku przepływu. Węzłowa reprezentacja obiegu zapewnia spójne łączenie poszczególnych modeli urządzeń oraz jednoznaczne definicje stanów przepływu na granicach elementów.

Czynnikiem roboczym jest mieszanina suchego powietrza i pary wodnej. W modelu uwzględniono rzeczywiste własności termodynamiczne i transportowe składników i mieszaniny, w tym zależności ciśnień cząstkowych, gęstości, entalpii, energii wewnętrznej oraz ciepła właściwego od temperatury i składu. Opis wilgoci obejmuje wielkości charakterystyczne dla powietrza wilgotnego (m.in. wilgotność właściwą oraz parametry związane z punktem rosy), a wymiana masy pary wodnej jest sprzężona z bilansem energii w obiegu i w złożu. Chłodnica realizuje odbiór ciepła jawnego oraz, w warunkach sprzyjających wykraplaniu, redukcję zawartości pary wodnej w powietrzu.

Złoże produktów modeluje jednocześnie dynamikę powietrza w porach oraz dynamikę termiczną owoców i warzyw w kolejnych komórkach obliczeniowych. Wprowadzono źródła ciepła wynikające z oddychania produktów, zależne od warunków termicznych, oraz człony strat ciepła do otoczenia chłodni, opisujące przenikanie przez przegrody i nieszczelności. Sprzężenie między przepływem, wymianą ciepła i transportem wilgoci umożliwia analizę przestrzenno-czasowych rozkładów temperatury i wilgotności w strumieniu powietrza oraz w masie przechowywanych produktów.

Rozwiązanie obejmuje sprzężony układ równań bilansowych złożony z równań o parametrach skupionych opisujących elementy obiegu oraz równań różniczkowych cząstkowych opisujących transport energii i masy w złożu warzyw i owoców. Zastosowana procedura numeryczna zapewnia jednoczesne uwzględnienie dynamiki przepływu w sieci,

wymiany ciepła i wilgoci oraz efektów źródłowych związanych z oddychaniem i stratami do otoczenia. Wyniki modelowania porównano z wynikami pomiarów przeprowadzonymi w rzeczywistej chłodni, obejmujących przebiegi temperatury i wilgotności w wybranych punktach obiegu oraz w złożu produktów.

Model stanowi narzędzie do ilościowej oceny przebiegów nieustalonych w chłodniach przechowalniczych, w tym wpływu wymuszenia wentylatorem, skuteczności chłodzenia, udziału zjawisk biologicznych (oddychanie) oraz strat do otoczenia na warunki przechowywania i jednorodność chłodzenia złoża.

Optymalizacja częstotliwości czyszczenia skraplacza pary w oparciu o modelowanie wydajności cieplnej i symulację elektrociepłowni

MARCIN TROJAN, SZYMON WIELGUS, DAWID TALER
KAROL KACZMARSKI, PIOTR DZIERWA, WIKTOR BLICHARSKI
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Procesów Cieplnych, Ochrony Powietrza i Utylizacji Odpadów
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: marcin.trojan@pk.edu.pl

Słowa kluczowe: skraplacz, czyszczenie skraplacza, modelowanie numeryczne bloku energetycznego, sprawność obiegu, stopień zanieczyszczenia

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu zanieczyszczenia powierzchni wewnętrznych rur kondensatora turbiny na parametry pracy bloku energetycznego oraz sprawność całego obiegu parowego. Analizy przeprowadzono na podstawie danych eksploatacyjnych, obliczeń cieplno-przepływowych oraz symulacji numerycznych. Wykazano, że narastanie osadów w kondensatorze prowadzi do pogorszenia warunków wymiany ciepła, co skutkuje koniecznością zwiększenia strumienia paliwa dostarczanego do kotła w celu utrzymania stałej produkcji energii elektrycznej i cieplnej. Zjawisku temu towarzyszy wzrost ilości ciepła przejmowanego przez wodę chłodzącą oraz obniżenie sprawności obiegu, a w konsekwencji wzrost kosztów eksploatacji.

W pracy zaproponowano metodykę oceny stopnia zanieczyszczenia kondensatora opartą na analizie strumienia ciepła odbieranego przez wodę chłodzącą. Kluczowym zagadnieniem okazała się dokładność pomiaru strumienia masy wody chłodzącej, determinująca wiarygodność bilansu cieplnego. Wykazano możliwość wykorzystania istniejącego kolana segmentowego rurociągu doprowadzającego wodę chłodzącą jako elementu pomiarowego przepływu, co pozwala na poprawę dokładności wyznaczania przejmowanego ciepła bez konieczności instalacji dodatkowej armatury pomiarowej.

Opracowano model numeryczny bloku energetycznego w programie Ebsilon umożliwiający analizę wpływu różnych poziomów zanieczyszczenia kondensatora na sprawność obiegu, zużycie paliwa oraz wskaźniki ekonomiczne. Porównanie stanów pracy dla czystego i zanieczyszczonego kondensatora pozwoliło określić przyrost energii chemicznej paliwa niezbędny do utrzymania zadanej mocy oraz wyznaczyć optymalne interwały czyszczenia urządzenia. Zaproponowane podejście stanowi kompleksowe narzędzie diagnostyczne wspomagające planowanie działań eksploatacyjnych i utrzymaniowych kondensatorów turbinowych z uwzględnieniem kryteriów energetycznych i ekonomicznych.

Application of rotodynamic and volumetric expanders for natural gas and other technical gases pressure reduction – a Review

JAKUB HOLENISZCZY, PIOTR KOLASIŃSKI
PolitechnikaWrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
e-mail: jakub.holeniszczy@pwr.edu.pl

Keywords: Natural Gas, Waste Energy, Pressure Reduction Station, Energy Recovery

Waste energy recovery is an important way of reducing the power consumption and optimization of already existing power systems, leading to reduction of costs and decrease of primary energy demand. This study is aimed at comprehensive, systematic review of literature related to technical gases pressure reduction.

For example, natural gas (NG) transmission pipeline system has a great potential for waste energy recovery, because of high transmission pressure (50–70 bar), required for overcoming the flow resistance, and low pressure demand for end user (up to 10 bar).

Before reaching final user, gas pressure has to be reduced in Pressure Reduction Station (PRS). The most popular solution is application of Throttle Valve (TV) which reduces the pressure of gas, but does not allow for energy recovery because of isenthalpic expansion process. Additionally, because of Joule-Thompson effect, temperature of NG is decreasing with decrease of pressure, which leads to hydrate formation in gas pipelines due to humidity presence in NG. This issue requires gas-powered line heaters for NG stream preheating, consuming some of the gas flow, to avoid low temperature hydrates formation.

Numerous research has been dedicated to PRS optimization process. Some articles discuss different approaches to NG preheating, by implementing PV panels, solar collectors, geothermal power or waste heat from Combined Heat and Power or Fuel Cells (FC) in order to decrease the preheating power consumption. Moreover, waste pressure energy recovery from expansion process is studied and researched. Applications of turbo-expanders, screw expanders, rolling piston expanders or reciprocating expansion engines are proposed for this process, with in-depth energy and exergy analysis, and potential power production calculations. A number of papers include hybrid systems of PRS expander pressure reduction with Organic Rankine Cycle systems or FC hydrogen production and storage, Combined Air Energy Storage systems or even turbo-expander-pump systems for Pump Storage Hydropower.

Review results show the insight into different applications of rotodynamic and volumetric expanders and the variety of its operating parameters.

Air-based building-integrated photovoltaic/thermal system with impinging jets under real environmental conditions – experimental approach

JAKUB ŁUKASIK, JAN WAJS

Gdańsk University of Technology, Fakulty of Mechanical Engineering and Ship Technology
Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: jakub.lukasik@pg.edu.pl, jan.wajs@pg.edu.pl

Keywords: photovoltaic/thermal (PV/T), jet impingement, air cooling, heat recovery, experimental study

Among the various heat transfer intensification techniques applicable to air-based building-integrated photovoltaic-thermal (BIPV/T) systems, the impinging jets are considered one of the most promising solutions. Preliminary steady-state multivariate computational fluid dynamics (CFD) simulations have shown that this technique can improve the overall electro-thermo-hydraulic performance of a BIPV/T system over the entire range of the air mass flow rates attainable within the system. Particularly high energy gains can be achieved under low Reynolds number conditions (defined at the inlet to the cooling channel). This enables efficient system operation with minor pressure drops and reduced fan power consumption.

Nevertheless, experimental validation of these numerical results is necessary. For this purpose, a dedicated mobile experimental test bench was developed. The research system consists of two separate, but identical air-cooled BIPV/T collector arrays: one equipped with impinging jets generated by a 3D-printed elongated nozzles, and the other equipped with a straight cooling channel of a rectangular cross-section, serving as the reference configuration. Airflow is forced by external blowers controlled via frequency converters. Maximum power point trackers are implemented in the main electrical circuits to ensure maximum electrical efficiency of the systems. All measuring devices are integrated into a fully automated and customized data acquisition system. The initial experimental analysis was conducted under spring conditions characterized by an air temperature of 10°C and solar irradiance in the range of 180–300 W/m^2. The obtained results indicate convergence with the numerical output data and confirm the readiness of the test bench for experimental investigations under dynamic environmental conditions.

Analiza możliwości pracy współczesnych hybrydowych systemów energetycznych z wykorzystaniem AI

MAŁGORZATA LESZCZYŃSKA-DOMAŃSKA [1], ROMAN DOMAŃSKI [2]

[1] Akademia Techniczno Artystyczna, Wydział Archtektury
ul. Olszewska 12, 00-792 Warszawa
[2] Sieć Badawcza Lukasiewicz Instytut Lotnictwa
Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa
e-mail: m.leszczynska@akademiata.pl, roman.domanski@ilot.lukasiewicz.gov.pl

Słowa kluczowe: układy hybrydowa, źródła energii, magazynowanie energii, bezpieczeństwo energetyczne, układy OZE

Współczesna transformacja energetyczna, wynikająca z rosnącego zapotrzebowania na energię oraz konieczności ograniczania emisji gazów cieplarnianych, prowadzi do dynamicznego rozwoju systemów wykorzystujących odnawialne źródła energii (OZE). Jednocześnie rosnąca niestabilność produkcji energii z takich źródeł jak energia słoneczna czy wiatrowa powoduje potrzebę integracji różnych technologii w ramach tzw. hybrydowych systemów energetycznych (HES – Hybrid Energy Systems). Systemy te łączą w sobie kilka źródeł wytwarzania energii oraz układy magazynowania, dzięki czemu możliwe jest zwiększenie niezawodności i bezpieczeństwa zasilania odbiorców energii. W ostatnich latach szczególnego znaczenia nabiera również wykorzystanie narzędzi sztucznej inteligencji (AI), które pozwalają na analizę pracy złożonych systemów energetycznych, prognozowanie produkcji energii oraz optymalizację ich pracy.

W artykule przedstawiona zostanie analiza możliwości pracy wybranych hybrydowych układów energetycznych stosowanych w sektorze budownictwa oraz w obiektach przemysłowych. Szczególna uwaga zostanie poświęcona wpływowi takich systemów na poziom bezpieczeństwa energetycznego obiektów o dużym znaczeniu infrastrukturalnym, takich jak szpitale, budynki wysokościowe czy obiekty przemysłowe wymagające ciągłości zasilania. W ramach pracy zaprezentowane zostaną modele wybranych źródeł energii, opracowane przy współpracy z narzędziami sztucznej inteligencji. Modele te obejmować będą między innymi instalacje fotowoltaiczne (PV), siłownie wiatrowe, pompy ciepła, baterie elektrochemiczne II rodzaju, generatory Diesla oraz ogniwa paliwowe.

Na podstawie przygotowanych modeli źródeł energii oraz systemów magazynowania zostaną utworzone moduły obliczeniowe pozwalające na symulację pracy hybrydowych systemów energetycznych w warunkach zmiennej produkcji energii ze źródeł odnawialnych.

Analiza obejmować będzie zarówno układy pracujące w trybie współpracy z siecią elektroenergetyczną (on-grid), jak i systemy autonomiczne (off-grid). W ramach badań przeprowadzona zostanie symulacja pracy systemów hybrydowych w cyklach dobowych oraz wielodniowych dla zmiennych warunków atmosferycznych. Szczególną uwagę poświęcono roli magazynów energii, których zadaniem jest kompensowanie wahań produkcji energii z OZE oraz stabilizacja pracy całego systemu. Z wykorzystaniem narzędzi AI przedstawione zostaną wykresy obrazujące pracę złożonych układów energetycznych, uwzględniające zmienne obciążenia, poziomy naładowania magazynów energii oraz zmienne warunki pogodowe.

W artykule zaprezentowany zostanie również sposób doboru pojemności magazynów energii oraz dodatkowych źródeł rezerwowych w zależności od charakterystyki pracy odnawialnych źródeł energii i profilu zapotrzebowania energetycznego obiektu. Omówione zostaną także warunki techniczne i eksploatacyjne, jakie muszą spełniać hybrydowe systemy energetyczne, aby zapewnić odpowiedni poziom niezawodności i bezpieczeństwa energetycznego.

Uzupełnieniem rozważań będą przykłady wybranych wdrożeń hybrydowych systemów energetycznych funkcjonujących obecnie na świecie, które stanowią istotny kierunek rozwoju nowoczesnej energetyki. W pracy podkreślone zostanie znaczenie magazynów energii jako kluczowego elementu integracji odnawialnych źródeł energii z systemami elektroenergetycznymi. Wskazana zostanie również rosnąca rola narzędzi sztucznej inteligencji w procesie projektowania, modelowania oraz optymalizacji pracy hybrydowych systemów energetycznych.

Przeprowadzone analizy wykażą jak ogromne znaczenie ma stosowanie magazynów energii w obszarze współpracy z OZE. Wskazana zostanie konieczność wdrażania i integracji rozwiązań hybrydowych dla zwiększenia niezawodności, bezpieczeństwa i efektywności energetycznej obiektów. Pokazane zostaną ogromne możliwości kontrolowanego wykorzystania AI do obliczeń, symulacji i analiz wdrażania HES w różnych obszarach energetyki.

The experimental investigation of the Organic Rankine Cycle – Thermal Energy Storage system

DAWID SOWA, PIOTR KOLASIŃSKI, SZYMON LECH
Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny
ul. Plac Grunwaldzki 9, 50-377 Wrocław
e-mail: dawid.sowa@pwr.edu.pl

Keywords: ORC, TES, power generation, fluctuating energy sources

Intermittent and floating heat sources, such as waste heat or solar thermal energy, present a challenge when are integrated into energy systems. The primary issue is the discrepancy between energy supply and demand. To address the variability of these sources, energy should be shifted from times of surplus energy production to times of energy scarcity. This requires temporarily storing energy in a suitable form, which, for heat, can be achieved through thermal energy storage (TES).

Among the existing technologies, the organic Rankine cycle (ORC) stands out for its potential in converting energy from unstable low-grade heat sources. This is mainly because it can function across a wide temperature spectrum, especially with low-temperature sources.

However, prolonged operation with fluctuating energy inputs can reduce the cycle's efficiency, as the system drifts from its original design conditions, or in the extreme cases it can even result in damage to the system components can be caused. For this reason, TES can be an interesting option to be applied to stabilise the operating parameters. This study presents the results of a series of experiments conducted using an Organic Rankine Cycle (ORC) prototype system powered by heat supplied from a Thermal Energy Storage (TES) unit. The TES was pre-charged using an electric boiler and tested under varying conditions, including different load levels and working fluid flow rates. Key measured parameters included temperature distribution inside the TES, pressure and temperature of the working fluid in selected measuring points in ORC test stand, flow rates of working fluids, and other variables. The large internal volume of the TES enabled prolonged ORC operation (sustained solely by stored thermal energy) without requiring an external power source for several hours.

The experimental data served as the source for developing a mathematical model, facilitating comparisons of alternative thermal energy storage materials and working fluids beyond those tested. This analysis aimed to identify the optimal thermal energy storage material-working fluid pair for specific operating conditions.

This research contributes to a clearer understanding of the system's behaviour, offering insights that may help to improve the utilisation of floating energy sources.

Experimental Comparison of Ejector-Driven and Compressor-Driven Operation in a Hybrid Two-Phase Ejector-Vapour-Compression Refrigeration System

JERZY GAGAN, KAMIL ŚMIERCIEW, DARIUSZ BUTRYMOWICZ
MICHAŁ ŁUKASZUK, PAWEŁ JAKOŃCZUK, ADAM DUDAR
ANDRZEJ PAWLUCZUK, MATEUSZ PAWŁOWSKI

Bialystok University of Technology
Wiejska 45C, Białystok, 15-351, Poland
e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Keywords: hybrid refrigeration system; two-phase ejector; vapour compression; ejector-compressor comparison; waste heat recovery

Hybrid refrigeration systems that combine a mechanical vapour compressor with a heat-driven two-phase ejector offer a way to exploit low-grade waste or solar heat alongside conventional electrically driven compression, using a shared evaporator and condenser circuit. This paper presents an experimental comparison of the two drive modes on a single test rig, in which the same evaporator can be served either by a heat-driven ejector branch (vapour generator, ejector, regenerator and a dedicated condenser) or by a mechanical compressor branch (compressor and a second, independent condenser), with each branch capable of being operated independently of the other.

Two dedicated measurement series were recorded, one with only the ejector branch active and the compressor branch idle, and one with only the compressor branch active and the generator/ejector branch idle. In ejector-mode operation, the vapour generator absorbed a heat input of approximately 118–136 kW, driving a refrigerant mass flow of 0.72–0.79 kg/s to the ejector at a motive pressure of about 12 bar and 58–68°C; essentially all condensation duty (154–167 kW) was handled by the ejector-side condenser via the regenerator, while the circulation pump required only 2.1–2.6 kW, and the evaporator delivered a cooling capacity averaging approximately 21.7 kW. In compressor-mode operation, with the generator branch confirmed idle, the compressor discharged at pressures of 3.9–8.7 bar and 25–42°C, condensation duty was shared between the two condensers, and the evaporator delivered a comparable average cooling capacity of approximately 23.4 kW.

These results show that the two branches, despite fundamentally different drive mechanisms – one thermally driven, one mechanically driven – can deliver closely comparable evaporator cooling duty while sharing the same evaporator hardware. This establishes

an experimentally validated baseline for both individual operating modes and provides the foundation for the next stage of the work: characterising simultaneous (combined) ejector-compressor operation, in which the heat-driven branch offloads part of the compressor duty depending on the availability of driving heat and the instantaneous cooling load.

Experimental investigation of a heat pump system supported by a two-phase ejector operating as a pressure booster

JERZY GAGAN, ANDRZEJ PAWLUCZUK, KAMIL ŚMIERCIEW
PAWEŁ JAKOŃCZUK, DARIUSZ BUTRYMOWICZ

Bialystok University of Technology
Wiejska 45C, Białystok, 15-351, Poland
e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Keywords: two-phase ejector; condensing ejector; pressure boosting; heat pump; natural refrigerants

Heat pumps using natural refrigerants are increasingly applied across a wide range of heating applications, where improving pressure lift and system efficiency under stable operating conditions remains a key challenge. Two-phase ejectors have been proposed as supporting components that can partially replace mechanical compression by recovering pressure energy without additional work input. However, their practical integration into heat pump systems and their real operating characteristics require experimental validation.

This paper presents an experimental investigation of a compressor-based heat pump system supported by a two-phase ejector operating as a pressure booster. The study is based on systematic experimental campaigns performed for two ejector configurations, focusing on the influence of operating conditions and ejector geometry on pressure distribution, mass flow rates, and overall system behaviour. The experimental methodology involved parametric variation of key operating parameters, including heat source temperature, mass flow rates, and ejector nozzle position, combined with detailed pressure measurements along the ejector and within the heat pump loop.

The results demonstrate that the ejector effectively contributes to the system pressure lift, reducing the pressure ratio handled by the compressor. Pressure distributions measured along the ejector confirm the occurrence of pressure recovery within the mixing and diffuser sections. Comparative analysis of two ejector configurations indicates a strong sensitivity of the pressure boosting effect to geometric parameters, particularly nozzle positioning.

The experimental findings confirm the feasibility of using two-phase ejectors as pressure-boosting devices in heat pump systems employing natural refrigerants. At the same time, the results highlight the importance of careful interpretation of measured pressures and temperatures, as non-equilibrium effects may influence the thermodynamic state at the ejector outlet. The presented study provides experimentally grounded insights relevant to the design and operation of ejector-assisted heat pump systems.

ROZDZIAŁ 11
SPALANIE, BIOMASA I GOSPODARKA ODPADAMI

More than carbon: the expanding role of biochar in a circular economy

ANETA MAGDZIARZ[1], AGATA MLONKA-MĘDRALA[2], WOJCIECH JERZAK[1]

[1] AGH University of Krakow, Faculty of Metals Engineering and Industrial Computer Science
Department of Heat Engineering & Environment Protection
[2] AGH University of Krakow, Faculty of Energy and Fuels
Department of Thermal and Fluid Flow Machines
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland
e-mail: amagdzia@agh.edu.pl

Keywords: biochar, pyrolysis, CO_2, carbon capture

The growth in waste from agriculture, the food industry, forestry, and the municipal sector is a key challenge facing the modern economy and waste management. Billions of tons of waste biomass are generated each year globally, a significant part of which still ends up in landfills or is used inefficiently for energy. This approach leads to resource loss, greenhouse gas emissions, and environmental pressure. In response to these challenges, thermochemical technologies are becoming increasingly important, enabling the simultaneous valorisation of waste and the production of energy and high-value-added materials, thus aligning with the principles of a circular economy.

Biochar, defined as the carbon-rich product of pyrolysis of biomass and other waste, is currently recognised as a key technology supporting the circular economy and waste management. However, its carbon sequestration potential is well known, and the latest research on biochar applications in agriculture, environmental protection, energy, and construction is extensive and in-depth.

From a climate balance perspective, the production and use of biochar can result in a carbon footprint of 2.0 to 3.3 kg CO_2-eq per 1 kg of biochar, depending on the type of raw material and the pyrolysis process parameters. It is estimated that global management of agricultural waste through biochar application would enable sequestration of ~500 Mt of CO_2. The key factors influencing the properties of the obtained biochar are the pyrolysis process conditions. Biochar produced at 500–700 °C is characterised by high carbon content and long-term stability.

In agriculture, the use of biochar improves soil structure, increases water retention, and reduces nitrogen and phosphorus leaching. Recent studies indicate that biochar can reduce nutrient losses by 20–50% while simultaneously increasing long-term yields. In environmental protection, biochar is used as an effective sorbent and catalyst. Modified biochars (e.g., doped with N, S, or metals) significantly increase the efficiency of organic pollutant degradation in advanced oxidation processes, achieving >90% removal

of pharmaceuticals and dyes. In the construction sector, integrating biochar into cementitious materials enables the creation of composites with a negative carbon footprint, while improving thermal insulation properties and potentially reducing material costs.

In conclusion, biochar is emerging as a multifunctional material that combines carbon sequestration, waste management, and improved efficiency in environmental and industrial processes.

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education, Poland (AGH grant no. 16.16.110.663).

Badania termiczne pirolizy węgla z biomasą w aspekcie gospodarki obiegu zamkniętego

AGNIESZKA KIJO-KLECZKOWSKA [1], MAGDALENA SZUMERA [2]
PAWEŁ RUTKOWSKI [2], MARCIN GAJEK [2], MAGDALENA LEŚNIAK [2]
JAROSŁAW KRZYWAŃSKI [3], WOJCIECH NOWAK [4], ADAM GNATOWSKI [1]

[1] Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej
ul. Dąbrowskiego 69, 42-201 Częstochowa
[2] Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
[3] Uniwersytet Jana Długosza w Częstochowie, Wydział Nauk Ścisłych, Przyrodniczych i Technicznych
Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa
[4] Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: a.kijo-kleczkowska@pcz.pl

Słowa kluczowe: węgiel, biomasa, piroliza, analiza termiczna TG/DSC/MS, analiza termodynamiczna

Jednym z kluczowych założeń Circular Economy jest racjonalne gospodarowanie odpadami, z uwzględnieniem coraz bardziej restrykcyjnych regulacji prawnych związanych z ochroną środowiska i emisją zanieczyszczeń do atmosfery. Należy podkreślić, że węgiel jest nadal podstawowym paliwem energetycznym, a rozwój cywilizacyjny generuje coraz większą ilość odpadów. Fakt ten stanowi inspirację do prowadzenia badań nad procesami termicznymi węgla z różnego rodzaju odpadami, nie tylko przez naukowców krajowych.

Niniejszy artykuł podejmuje problematykę współpirolizy węgla kamiennego z odpadami biomasy (o udziale masowym biomasy w paliwie: 25, 50 i 75%), w kontekście analizy termicznej i termodynamicznej, a także wydzielania gazów podczas procesu, przede wszystkim wodoru, metanu, tlenku i dwutlenku węgla. Pomiary przeprowadzono w atmosferze argonu, w zakresie temperatury od ok. 20°C do 1000°C, z wykorzystaniem metod: termograwimetrii (TGA), skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC) oraz spektrometrii mas (MS). W aspekcie nowatorstwa pracy, wyniki badań umożliwiły kompleksową, porównawczą analizę przebiegu pirolizy wspomnianych paliw, również w kontekście wartości parametrów kinetycznych i termodynamicznych (z uwzględnieniem trzech szybkości nagrzewania: 5, 10 i 15 K/min), obliczonych z wykorzystaniem metod Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), Ozawa-Flynn-Wall (OFW) i Starinka. Wykazano, że zwiększenie szybkości nagrzewania prowadzi do wzrostu wartości maksymalnej szybkości ubytku masy paliwa ($DTG_{max.}$) oraz wzrostu odpowiadającej jej temperatury ($T_{DTG,max.}$), przy czym $DTG_{max.}$ wzrasta wraz ze zwiększeniem udziału biomasy w paliwie (przy spadku $T_{DTG,max.}$), co wskazuje na intensyfikację procesu. Analiza pirolizy w kolejnych etapach konwersji rozpatrywanych paliw umożliwiła określenie zmian wartości energii aktywacji (E_a)

i entalpii (ΔH), identyfikującej endo- i egzotermiczne etapy procesu. Uzyskane ujemne wartości entropii (ΔS), będącej wskaźnikiem stopnia nieuporządkowania układu, umożliwiły stwierdzenie, że struktura paliw ewoluuje od nieuporządkowanej do zorganizowanej, w miarę trwania procesu. W zakresie temperatur 20–600°C, autorzy wykazali niższe średnie wartości pojemności cieplnej właściwej (c_p) rozpatrywanych odpadów biomasy w porównaniu do węgla, z tendencją narastającą wraz ze wzrostem zawartości węgla w analizowanych mieszankach paliwowych. Stwierdzone synergiczne zachowanie mieszanek węgla i odpadów biomasy podczas współpirolizy przemawia za większą atrakcyjnością tego procesu, pod względem energetycznym i środowiskowym, w odniesieniu do paliw podstawowych.

Carbon gasification in CO_2 over ultra-porous coffee-waste biochar: reactivity and kinetics

WOJCIECH JERZAK, IZABELA KALEMBA-REC, ANETA MAGDZIARZ

AGH University of Krakow, Faculty of Metals Engineering and Industrial Computer Science
Department of Heat Engineering & Environment Protection
Department of Surface Engineering & Materials Characterisation
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland
e-mail: wjerzak@agh.edu.pl

Keywords: biochar; KOH activation, spent coffee grounds, CO_2 gasification; thermogravimetric analysis; specific surface area, carbon reactivity

Spent coffee grounds were converted to biochar under nitrogen at 800°C. Pristine biochar was subsequently activated with KOH (biochar: KOH = 1:3) for 30 and 60 min. The evolution of textural properties, surface chemistry, ash content, and CO_2 gasification behaviour was systematically investigated using Brunauer–Emmett–Teller (BET) analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FT–IR), ultimate analysis, ash determination, scanning electron microscopy (SEM), and thermogravimetric analysis (TG–DTG). TG experiments were carried out under CO_2 at heating rates of 2.5, 5 and 10°C min^{-1} to examine the Boudouard reaction ($C + CO_2 \rightarrow 2CO$).

KOH activation resulted in a rapid transformation from a nearly non-porous biochar (2.6 $m^2 g^{-1}$) to ultra-high surface area carbons (1514 $m^2 g^{-1}$). This transformation was accompanied by a significant increase in the total volume of pores, from 0.0023 to 0.6673 $cm^3 g^{-1}$. A dominant microporous structure was developed, with an average pore diameter of approximately 1.7 nm. SEM observations confirmed a significant modification of the surface texture and pore architecture as a result of activation.

Despite the significant increase in porosity, the reactivity of carbon gasification in CO_2 decreased markedly after KOH activation. This effect was evidenced by a clear shift of the DTG peak temperatures toward higher values. The peak temperature increased from 849 to 914°C for pristine biochar to 915 to 969°C for the activated sample for 30 min. For the sample activated for 60 min, the maximum peak of DTG exceeded 1000°C at a heating rate of 10°C min^{-1}, exceeding the operational temperature limit of the TG instrument. Under these conditions, approximately 22% of the biochar mass remained unreacted at 1000°C, whereas only 0.3% residue was observed at a heating rate of 2.5°C min^{-1}, indicating severely suppressed CO_2 gasification kinetics.

Kinetic analysis using the Kissinger method showed a significant increase in the apparent activation energy of carbon gasification in CO_2. The activation energy increases from approximately 219 kJ mol^{-1} for pristine biochar to 259 kJ mol^{-1} for KOH-activated carbon

treated for 30 min. This behaviour is attributed to the removal of catalytically active inorganic species during acid washing, the elimination of highly reactive amorphous carbon fractions, and the increased structural ordering of the carbon matrix. These factors collectively shift the reaction to an intrinsic carbon-controlled regime.

This research was funded in part by the National Science Centre, Poland [*Grant no. 2023/51/B/ST8/01531*]. *Textural properties studies were carried out using research infrastructure purchased from the "Excellence initiative – research university" programme for the AGH University of Krakow.*

Modelowanie numeryczne procesu odpylania w elektrofiltrze

ARKADIUSZ RYFA [1], JONASZ JANASZAK [1], NATALIA KOTUŁA [2]
MONIKA RASZTABIGA [1], JACK KRISTOFFERSSON [3], PAWEŁ KAK [3]

[1] Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
[2]Energoprojekt Katowice, Jesionowa 15, 40-159 Katowice
[3]Uddevalla Energi Nitstansvägen 2, 451 55 Uddevalla, Szwecja
e-mail: arkadiusz.ryfa@polsl.pl

Słowa kluczowe: CFD, modelowanie komputerowe, elektrofiltr, odpylanie

W pracy zaprezentowano nowatorskie podejście do modelowania procesu odpylania w elektrofiltrze. Ze względu na dużą różnicę skali pomiędzy wymiarami elektrofiltru (kilka metrów) oraz rozmiaru pojedynczej elektrody ładującej (kilka-kilkanaście milimetrów) nie jest możliwe wierne oddanie geometrii elektrofiltru bez siatki numerycznej idącej w setki milionów elementów. Brak możliwości oddania geometrii elektrod ładujących powoduje niemożność policzenia pola elektrycznego odpowiadającego za ładowanie cząstek. Dlatego też zadecydowano o przygotowaniu modelu powtarzającej się sekcji elektrod w której zarówno elektrody ładujące jak i zbierające zostały dokładnie odwzorowane. To pozwoliło na wykorzystanie modelu sekcji elektrod do wyznaczenia pole elektrycznego i jego składowych. W drugim kroku wyznaczone wielkości zostały odpowiednio powielone i przeniesione do modelu zawierającego cały elektrofiltr jednak bez elektrod ładujących i z uproszczonymi elektrodami zbierającymi. Algorytm przenoszący pola wykonano w języku Python. Obydwa modele CFD wykonano w programie Ansys/Fluent. Do modelowania ruchu cząstek użyto modelu DPM a do wyznaczenia sił oddziałujących na cząstki znajdujące się w polu elektrycznym wykorzystano model MHD. Jedynym brakiem modelu MHD jest brak możliwości ładowania cząstek. Dlatego też zaimplementowano algorytm ładowania cząstek w polu elektrostatycznym poprzez funkcje użytkownika. Dzięki temu czas obliczeń pełnego elektrofiltru wynosi kilka godzin. Opracowany model zwalidowano danymi pomiarowymi od partnera przemysłowego.

Badania eksperymentalne i analiza CFD procesu separacji pyłu w cyklonie pracującym w strumieniu wysokotemperaturowych spalin z biomasy

SZYMON PIETER[1], *DARIUSZ KARDAŚ*[2]

[1] Trójmiejska Szkoła Doktorska Polskiej Akademii Nauk
ul. Fiszera 14, 80-231 Gdańsk
[2] Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk
ul. Fiszera 14, 80-231 Gdańsk
e-mail: pieter@klimosz.pl, dk@imp.gda.pl

Słowa kluczowe: spalanie biomasy, cyklon wysokotemperaturowy, separacja pyłu, analiza CFD

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych procesu separacji pyłu w cyklonie pracującym w strumieniu gorących gazów spalinowych pochodzących ze spalania peletu biomasowego. Celem pracy była ocena skuteczności odpylania w warunkach podwyższonej temperatury (600–800°C), znacząco odbiegających od typowych parametrów pracy klasycznych cyklonów przemysłowych.

Stanowisko badawcze składało się z palnika na pelet biomasowy, cyklonu odpylającego oraz zlokalizowanej za nim strefy wymiany ciepła. Pył powstający w procesie spalania był unoszony w strumieniu spalin o wysokiej temperaturze i zmiennym natężeniu przepływu, co powodowało pracę cyklonu w warunkach zmienionej gęstości i lepkości gazu, a także zwiększonego obciążenia cieplnego ścian urządzenia. Pomiary przeprowadzono dla różnych wydatków pracy palnika oraz różnych strumieni objętościowych spalin, co umożliwiło analizę wpływu parametrów przepływowych na skuteczność separacji i straty ciśnienia.

Badania eksperymentalne uzupełniono analizą numeryczną z wykorzystaniem metod CFD (Computational Fluid Dynamics). Model numeryczny pozwolił na szczegółowe odwzorowanie pola prędkości, rozkładu ciśnienia oraz trajektorii cząstek stałych w przestrzeni roboczej cyklonu. Zastosowane modele turbulencji i modele fazy rozproszonej umożliwiły pogłębioną analizę mechanizmów separacji w warunkach wysokotemperaturowych oraz identyfikację stref intensywnej recyrkulacji i potencjalnej reemisji cząstek.

Uzyskane wyniki wskazują na istotny wpływ temperatury oraz parametrów przepływu na efektywność odpylania. Analiza CFD pozwoliła lepiej zrozumieć strukturę przepływu wirowego oraz proces oddziaływania cząstek z polem przepływu w niestandardowych warunkach eksploatacyjnych. Praca stanowi podstawę do dalszej optymalizacji konstrukcji cyklonów przeznaczonych do pracy w instalacjach spalania biomasy oraz w układach wysokotemperaturowych.

Praktyczny układ do efektywnej konwersji energii z biomasy

ROBERT ZARZYCKI, RAFAŁ KOBYŁECKI
Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska
ul. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa
e-mail: robert.zarzycki@pcz.pl, rafal.kobylecki@pcz.pl

Słowa kluczowe: biomasa, biowęgiel, CO_2

Praca poświęcona jest przedstawieniu koncepcji układu przemysłowego do przetwarzania biomasy różnego pochodzenia – leśnej, rolnej oraz wybranych frakcji biomasy odpadowej. W efekcie termicznego przetwarzania wsadu następuje jego suszenie oraz karbonizowanie poprzez wykorzystanie ciepła wytwarzanego ze spalanych części lotnych z biomasy. Realizacja procesu przetwarzania biomasy według zaproponowanej koncepcji pozwala na elastyczną kontrolę stopnia karbonizacji i ilości wydzielanego ciepła, które następnie może być wykorzystane np. w kotłach odzysknicowych. Zaproponowany układ został zamodelowany numerycznie, a wyniki modelowania ujęto w referacie porównując je z wybranymi danymi ruchowymi pilotowego układu rzeczywistego o mocy cieplnej około 5 MW.

Projekt i badania niskoemisyjnego biomasowego palnika pirolitycznego

MICHAŁ WANTUŁA [1], DARIUSZ KARDAŚ [2]

[1] Trójmiejska Szkoła Doktorska Polskiej Akademii Nauk
ul. Fiszera 14, 80-231 Gdańsk
[2] Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk
ul. Fiszera 14, 80-231 Gdańsk
e-mail: wantula@klimosz.pl, dk@imp.gda.pl

Słowa kluczowe: piroliza, spalanie biomasy, redukcja CO, pelet, palnik peletowy

Celem pracy było opracowanie projektu niskoemisyjnego palnika pirolitycznego do spalania biomasy peletowej oraz jego eksperymentalna ocena w porównaniu z palnikiem konwencjonalnym. Szczególną uwagę poświęcono wpływowi rozdziału powietrza pierwotnego i wtórnego na organizację procesu spalania, stabilność dopalania gazów oraz emisję zanieczyszczeń. Praca obejmuje opis konstrukcji obu typów palników, charakterystykę stanowiska badawczego oraz analizę wyników pomiarów uzyskanych podczas spalania biomasy.

W ramach badań zaprojektowano i wykonano prototyp palnika pirolitycznego, który następnie poddano testom eksperymentalnym w układzie porównawczym z palnikiem konwencjonalnym. Zastosowano komorę badawczą umożliwiającą prowadzenie pomiarów aparaturą kontrolno-pomiarową (analizatory gazów, system akwizycji danych) oraz wizualną obserwację przebiegu procesu spalania w palenisku.

Analizie poddano emisję tlenku węgla (CO), tlenków azotu (NO_x), temperaturę spalin oraz stężenie cząstek stałych. Uzyskane wyniki wskazują na istotnie niższe wartości wszystkich analizowanych parametrów w przypadku palnika pirolitycznego. Średnia emisja CO wynosiła 30 mg/m³ wobec 295 mg/m³ dla palnika konwencjonalnego, co odpowiada redukcji na poziomie około 90%. Emisja NO_x wynosiła odpowiednio 88 mg/m³ i 130 mg/m³. Temperatura spalin w palniku pirolitycznym była o około 40°C niższa i wynosiła 88°C.

Emisja pyłu dla palnika pirolitycznego wynosiła 16 mg/m³, natomiast dla palnika konwencjonalnego 34 mg/m³, co stanowi ponad dwukrotną redukcję. Zaobserwowane różnice w emisji i temperaturze mogą wynikać z odmiennych warunków przepływu powietrza i organizacji spalania, związanych z zastosowaniem różnych układów wentylacji oraz intensywności mieszania w strefie spalania. W przypadku palnika konwencjonalnego stwierdzono również obecność osadu o charakterze sadzy na sączkach filtracyjnych.

Przedstawione wyniki mają charakter wstępny i wskazują na potencjał zastosowania palników pirolitycznych w ograniczaniu emisji zanieczyszczeń oraz poprawie efektywności procesu spalania biomasy. Stanowią one podstawę do dalszych prac optymalizacyjnych nad konstrukcją układu oraz organizacją procesu spalania.

Solwoliza odpadów tekstylnych jako kierunek odzysku surowców i energii

LYUDMILA SLOBODKINA [1], ROKSANA MUZYKA [2]
SZYMON SOBEK [3], MARCIN SAJDAK [2], SEBASTIAN WERLE [1]

[1] Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Techniki Cieplnej
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
[2] Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Ochrony Powietrza
ul. Konarskiego 22b, 44-100 Gliwice
[3] Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,
Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania
ul. Konarskiego 20, 44-100 Gliwice
e-mail: sebastian.werle@polsl.pl

Słowa kluczowe: odpady tekstylne, solwoliza, analiza ANOVA, odzysk

Wyroby tekstylne stanowią ważny element codziennego życia, jednak ich wpływ na środowisko u schyłku cyklu życia nadal nie jest dostatecznie poznany. Dynamiczny wzrost produkcji włókien syntetycznych doprowadził do gwałtownego zwiększenia ilości odpadów tekstylnych, które stanowią potencjalne źródło surowców wtórnych możliwych do ponownego wykorzystania i odzysku w procesach chemicznych. W artykule przedstawiono badania dotyczące alkalicznej solwolizy włókien tekstylnych jako skutecznej metody chemicznego recyklingu złożonych strumieni odpadów.

Eksperymenty degradacji włókien zaprojektowano z zastosowaniem metody planowania doświadczeń (DoE) dla czterech rodzajów włókien należących do dwóch klas (naturalnych i syntetycznych), co umożliwiło optymalizację kluczowych parametrów procesu, takich jak temperatura, czas reakcji, stosunek włókna do cieczy oraz stężenie wodorotlenku potasu. Etap przygotowawczy obejmował charakterystykę materiałów wyjściowych z wykorzystaniem analizy termograwimetrycznej (TGA), spektroskopii FTIR oraz pirolizy analitycznej sprzężonej z GC-MS.

Zbadano wpływ czterech niezależnych zmiennych procesowych, a mianowicie temperatury, czasu reakcji, stosunku włókna do cieczy oraz stężenia wodorotlenku potasu (160–180 °C, 10–30 minut, 10–20% oraz 0,5–10,0%), na efektywność procesu. Na podstawie optymalizacji i wstępnej selekcji rozpuszczalników układy glikolowe zidentyfikowano jako najskuteczniejsze media reakcyjne, a do dalszych badań wybrano mieszaninę glikolu propylenowego i glikolu etylenowego.

Na tej podstawie przeprowadzono 65 eksperymentów solwolizy dla włókien o różnym składzie chemicznym, w tym poliestrowych, poliamidowych, bawełnianych oraz celulozowych. Jako parametr odpowiedzi przyjęto całkowitą degradację włókien (TFD). Analiza

ANOVA, oparta na danych z eksperymentów przeprowadzonych zgodnie z metodologią DoE, pozwoliła na określenie optymalnych warunków procesu sprzyjających maksymalizacji wydajności otrzymywania wybranych związków.

Wyniki potwierdzają potencjał alkalicznej solwolizy jako obiecującej technologii chemicznego recyklingu tekstyliów, umożliwiającej odzysk cennych monomerów i chemicznych związków pośrednich.

Badania eksperymentalne w otwartym sorpcyjnym magazynie ciepła z wykorzystaniem silikażelu

BARTŁOMIEJ WAJDA, ŁUKASZ CIEŚLIKIEWICZ, PIOTR ŁAPKA
Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa
e-mail: bartlomiej.wajda.dokt@pw.edu.pl, lukasz.cieslikiewicz@pw.edu.pl, piotr.lapka@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: magazynowanie ciepła, otwarty sorpcyjny magazyn ciepła, silikażel

Magazynowanie ciepła jest zagadnieniem, które w klimacie umiarkowanym, jak i kontynentalnym jest niezwykle ważne dla zapewnienia, przy wykorzystaniu odnawialnych źródeł ciepła, komfortu cieplnego. Tradycyjnie stosowane magazynowanie ciepła w cieple jawnym materiałów, jak i coraz popularniejsze materiały zmiennofazowe mają zasadniczą wadę, którą jest samorozładowanie. Wymiana ciepła ustaje tylko wtedy, gdy nie ma różnicy temperatur między magazynem i otoczeniem. Żeby zmniejszyć samorozładowanie, stosuje się izolacje termiczne, co podnosi koszt magazynu, ale nie rozwiązuje problemu. Wciąż w perspektywie dni i tygodni samorozładowanie jest tak duże, że magazyn przestaje być użyteczny.

Możliwym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie konwersji ciepła na potencjał sorpcyjny. Można to zrobić za pomocą higroskopijnych materiałów porowatych, takich jak zeolity, sita molekularne, krzemionka czy silikażel. Odpowiednia budowa tych materiałów powoduje, że następuje zatrzymanie cząsteczek wody na ich powierzchni. Związaniu wody na powierzchni porów materiału (proces sorpcji) towarzyszy wydzielenie ciepła, natomiast usuwanie wilgoci z materiału (proces desorpcji) wymaga dostarczenia ciepła do układu, np. ze źródeł odnawialnych. Odwracalność tych procesów sprawia, że można je wykorzystać do magazynowania ciepła. Dlatego, łatwiej jest uniknąć samoistnego rozładowania niż w przypadku wcześniej wymienionych technologii – wystarczy umieścić osuszony materiał sorpcyjny w szczelnym pojemniku i w ten sposób długotrwałe magazynowanie jest możliwe. Wreszcie większa gęstość energii w porównaniu z magazynami wykorzystującymi ciepło jawne i utajone są argumentami przemawiającymi za istotnością badań w tym obszarze.

W artykule opisano skonstruowaną prototypową laboratoryjną instalację otwartego sorpcyjnego magazynu ciepła oraz badania na niej wykonane z wykorzystaniem silikażelu jako materiału magazynującego ciepło. Za pomocą pomiarów temperatury, wilgotności względnej i wydatku masowego sprawdzono, jak zmienia się moc oraz pojemność magazynu w funkcji kolejnych cykli ładowania-rozładowania. Zbadano, jaki wpływ mają parametry przepływającego powietrza wilgotnego na magazynowane ciepło. Siatka

pomiarowa obejmowała różne temperatury ładowania, jak i rozładowania oraz różne prędkości przepływu. Zaproponowano najlepsze parametry pracy magazynu pod kątem największej mocy, jak i największej zmagazynowanej energii. Przedstawiono kierunki dalszego rozwoju, jak i możliwe ulepszenia opracowanej instalacji.

ROZDZIAŁ 12
METROLOGIA CIEPLNA, MODELOWANIE NUMERYCZNE I ZAGADNIENIA INTERDYSCYPLINARNE

Wpływ parametrów klimatycznych na współczynnik przewodzenia ciepła wybranych izolatorów budowlanych

ROBERT KANIOWSKI[1,2], *KAROLINA BĘBACZ*[2]
ALEKSANDRA MALINOWSKA[2], *RAFAŁ JAROSZ*[3]

[1] Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
al. 1000-lecia P.P. 7, 25-314 Kielce
[2] Świętokrzyski Kampus Laboratoryjny Głównego Urzędu Miar
ul. Wrzosowa 46, 25-211 Kielce
[3] Główny Urzędu Miar
ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa
e-mail: robert.kaniowski@gum.gov.pl, karolina.bebacz@gum.gov.pl,
aleksandra.malinowska@gum.gov.pl, rafał.jarosz@gum.gov.pl

Słowa kluczowe: współczynnik przewodzenia ciepła, izolatory budowlane, sztuczne postarzanie, metoda strumienia ciepła

Działalność badawczo-rozwojowa prowadzona zarówno w przemyśle, jak i w środowisku akademickim koncentruje się na zagadnieniach związanych z racjonalnym gospodarowaniem energią oraz jej pozyskiwaniem ze źródeł alternatywnych. Szczególnie istotny potencjał rozwoju obserwuje się w obszarze materiałów izolacyjnych oraz technologii efektywnej izolacji termicznej budynków mieszkalnych i komercyjnych, co wymaga zapewnienia wysokiej, powtarzalnej jakości procesów wytwarzania oraz rygorystycznej kontroli właściwości użytkowych tych materiałów przed wprowadzeniem do obrotu. Jedną z podstawowych technik stosowanych w tym zakresie tj. pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła jest metoda czujnika strumienia cieplnego, w której próbka materiału o znanych wymiarach umieszczana jest pomiędzy dwiema płytami o różnych temperaturach, zgodnie z normą PN-EN 12667:2002. Jedna płyta jest podgrzewana, a druga chłodzona, co prowadzi do powstania ustalonego gradientu temperatury w materiale i przepływu ciepła od strony cieplejszej do chłodniejszej. Podczas pomiaru rejestrowany jest strumień ciepła oraz różnica temperatur na próbce, a na podstawie prawa Fouriera wyznacza się współczynnik przewodzenia ciepła badanego materiału, z uwzględnieniem jego wymiarów oraz oporów cieplnych na styku z płytami pomiarowymi.

Celem niniejszej pracy była ocena wpływu parametrów klimatycznych takich jak temperatura, wilgotność powietrza na przewodność cieplną materiałów izolacyjnych. Przewodność cieplną mierzono zarówno przed, jak i po ekspozycji na wspomniane czynniki klimatyczne. Wyniki wskazują, że stabilność cieplna badanych materiałów jest uzależniona od ich struktury wewnętrznej oraz procesów fizykochemicznych zachodzących

w trakcie eksploatacji. Spośród badanych materiałów Pianka PUR cechuje się wzrostem λ w wyniku starzenia się materiału, co wpływa na spadek efektywności izolacji. Wyniki podkreślają znaczenie doboru trwałych materiałów w projektowaniu izolacji cieplnej.

Impulse pressure standard measurement uncertainty selected issues

KAROLINA CHROBOT[1], PIOTR CYKLIS[2]

[1] Główny Urząd Miar Laboratorium Nowych Technologii Masy i Wielkości Pochodnych
Zakład Mechaniki i Akustyki
ul. Wrzosowa 46, 25-211 Kielce
[2] Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny Katedra Inżynierii Cieplnej i Procesowej
al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków
e-mail: karolina.chrobot@gum.gov.pl, piotr.cyklis@pk.edu.pl

Keywords: impulse pressure, fast changing pressure standard, measurement uncertainty

Measurement of rapidly changing pressure requires a measuring sensor with response times of less than 10 [ms], i.e., a transmission frequency exceeding 100 [kHz]. Such measurements are used in the monitoring of engines and compressors, with military applications (explosions) being the most demanding. For this reason, pressure transducers based primarily on piezoelectric phenomena are the most commonly used; this means that the measured electrical charge is transient and such transducers cannot be calibrated statically. In high-pressure applications, it is necessary to mechanically induce a pressure pulse in a shock-like manner within the liquid. This allows the pressure results to be related to the mass falling from a specific height in accordance with the fundamental equations of Newtonian dynamics. This theory is well-known, and in practice, the velocity of the falling mass is measured directly using laser methods. The problem that arises in estimating measurement uncertainty is that during collision, part of the falling mass's kinetic energy of the falling mass is lost and converted to heat. Assessing the impact of not accounting for this phenomenon on measurement uncertainty requires the development of simulation models enabling analysis of both the collision process and the propagation of the pressure wave in the liquid tank. This depends on the properties of the liquid, which are also difficult to determine, in particular, the compressibility of the oils used. This paper briefly discusses the operating principle of the standard, together with a calculation of the basic measurement uncertainty. The main part of the paper consists of a simulation of the process using two simulation methods with the aim of determining the influence of impacts and the liquid on the measurement uncertainty. The first step is a 1D, unsteady simulation of the dynamic impact of a mass on a piston and subsequently of the piston on the liquid. This was carried out using the SimulationX software. This allows the velocity profile to be determined and compared with the experimentally recorded profile. The result is the variable velocity of the plunger striking the liquid. The velocity distribution of the impacting mass is then introduced as a boundary condition

for the simulation of pressure propagation in the liquid tank, where the impacted plunger operates with a specified dimensional tolerance. The liquid model assumes compressibility and viscosity. The simulation is performed in FLUENT. The simulation results are consistent with the measured velocity and pressure data, indicating that the standard is functioning correctly. Nevertheless, it is evident that the impact energy influences the results and must be correctly accounted for in the uncertainty of the measurement. Quantitative consideration of the impact and type of liquid is the subject of further analysis.

Modelowanie ruchu azotu w kriosaunie za pomocą CFD

SZYMON KNAP[1], *PIOTR CYKLIS*[2]

[1] JUKA Sp. z o.o. Sp. K.
Poland, 32-005 Niepołomice, ul.Fabryczna 4
[2] Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny Katedra Inżynierii Cieplnej i Procesowej
al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków
e-mail: szymon.knap@doktorant.pk.edu.pl, piotr.cyklis@pk.edu.pl

Słowa kluczowe: sauna kriogeniczna, kriosauna, CFD kriogeniczne, kriogeniczna weryfikacja eksperymentalna

Kriosauny są coraz częściej stosowanymi urządzeniami wspomagającymi leczenie różnych dolegliwości. Zabieg krioterapii częściowej w kriosaunie polega na zanurzeniu ciała pacjenta w oparach azotu o temperaturze do –140 [°C] przy jednoczesnym utrzymaniu głowy powyżej poziomu oparów dla zapewnienia możliwości swobodnego oddychania. Czas zabiegu wynosi 2–3 minuty, dlatego dla zapewnienia prawidłowej pracy urządzenia konieczne jest rozwiązanie kilku istotnych kwestii. Podczas wchodzenia i wychodzenia pacjenta z komory drzwi pozostają otwarte, co skutkuje ubytkiem odparowanego azotu, a co ważniejsze wzrostem temperatury. W rezultacie pacjent rozpoczyna ekspozycję w temperaturze wyższej od założonej, a część czasu zabiegu obejmuje fazę ponownego obniżenia i stabilizacji temperatury, co skraca efektywny czas właściwej ekspozycji terapeutycznej. Celem przedstawianej pracy jest model symulacyjny stosujący narzędzie CFD FLUENT do analizy ruchu azotu doprowadzonego do sauny. Modele takie są opracowane również w literaturze, ale tu nowością jest sposób weryfikacji i przygotowanie opracowanej metody do optymalizacji kształtu nowego urządzenia. W przeprowadzonych symulacjach jest potrzeba uzyskania odpowiedzi również dla procesu nieustalonego, czyli wchodzenia i wychodzenia pacjenta z sauny. Opracowanie modelu obejmuje dobór odpowiednich metod numerycznych, siatki, modeli domykających. Trudność polega na tym, że właściwie nie analizujemy przepływu, który jest tu ograniczony a raczej ruch azotu o temperaturze –140 [°C], co ważniejsze rozkład temperatury na powierzchni ciała pacjenta. Problem doboru metod numerycznych w takich warunkach połączenia dostarczania azotu i konwekcji swobodnej w otwartej przestrzeni (kriosauna ma otwartą górę) jest trudny i wymaga potwierdzenia doświadczalnego, aby można było przystąpić do optymalizacji geometrii sauny i nawiewu azotu. W tym celu zbudowane zostało stanowisko pomiarowe oparte na aktualnej konstrukcji kriosauny. Do stanowiska został wprowadzony manekin postaci pacjenta dla umożliwienia analizy rozkładu prędkości i temperatury dookoła ciała. Ponadto rejestrowano też rozkład azotu widocznego na wypływie górą z kriosauny, podczas zabiegu. Jednym z ważnych warunków jest bowiem

bezpieczeństwo pacjenta, który nie powinien wdychać azotu podczas zabiegu. W artykule przedstawiono metodykę symulacji wybraną dla uzyskania zgodności z wynikami pomiarów. Przedstawiono też stanowisko pomiarowe wraz z wynikami badań i weryfikacją eksperymentalną na obecnym etapie prac.

Doświadczalne badania charakterystyk aerozolu wodnego w poddźwiękowym tunelu aerodynamicznym do badań zjawisk oblodzeniowych w lotnictwie

ALEKSANDRA ZARUBAJKO, ANDRZEJ J. PANAS
ŁUKASZ OMEN, MICHAŁ FRANT, MACIEJ MAJCHER
Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego
Wydział Mechatroniki Uzbrojenia i Lotnictwa
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
e-mail: aleksandra.zarubajko@wat.edu.pl

Słowa kluczowe: aerozol wodny, poddźwiękowy tunel aerodynamiczny, oblodzenie, lotnictwo, rozkład kropel, nawadnianie

Prezentowana praca dotyczy doświadczalnych badań nawadniania przepływu części pomiarowej tunelu aerodynamicznego małych prędkości w kontekście zjawisk oblodzeniowych statków powietrznych oraz badania układów technicznych eksploatowanych w omawianych warunkach. Zasadnicza część badawcza skoncentrowana była na określeniu parametrów przepływu dwufazowego (rozkładu przestrzennego, zmian w czasie, charakterystyk aerozolu) jako podstawy badań doświadczalnych podstawowych i użytkowych; określenie podobieństw i różnic w odniesieniu do zawiesin atmosferycznych.

Nawadnianie wykonywano z wykorzystaniem trzech, dwudyszowych wtryskiwaczy o średnicy dyszy 2 mm i kącie wtrysku 60 stopni. Wtryskiwacze usytuowane szeregowo w płaszczyźnie pionowej kanału przepływowego tunelu umożliwiały zmianę czasu trwania nawadniania. Praktyczna realizacja pomiarów granulometrycznych wymagała wykorzystania analizatora cząstek IPS SAM Kamika zamocowanego wysięgnikowo w przestrzeni pomiarowej tunelu. Zestawione stanowisko badawcze umożliwiało akwizycję danych doświadczalnych w wybranych punktach trzech płaszczyzn pomiarowych, prostopadłych do osi symetrii części pomiarowej tunelu dedykowanemu badaniom aerodynamicznym w zakresie prędkości do 50 m/s wraz z możliwością obniżenia temperatury powietrza do –10°C. Gros uwagi skupiono na analizie wyników rejestrowanych w centralnym punkcie przestrzeni pomiarowej. Badania zasadnicze wykonano przy ciśnieniu dynamicznym powietrza na poziomie 500 Pa oraz dla średniego masowego wydatku wody na poziomie 26 g/s.

Wyniki badań eksperymentalnych pozwoliły na ilościowe (zestaw charakterystyk granulometrycznych dla kropel w zakresie od 0,5 μm do 300 μm) oraz jakościowe scharakteryzowanie przestrzennego pola przepływu wody. Szczegółowa analiza potwierdziła ilościową przewagę małych kropel w przepływie i dominujący wpływ dużych kropel

na objętość transportowanej wody. Wyznaczone lokalnie rozkłady różniczkowe i całkowe dla udziałów ilościowych, powierzchniowych oraz objętościowych wskazują na rozbieżności wynikające z zakresu ilości rejestrowanych cząstek przy niskim stężeniu lub dużym rozproszeniu strugi aerozolu.

Uzyskane wyniki badań są istotnym dopełnieniem danych dotyczących funkcjonowania wykorzystywanego tunelu aerodynamicznego oraz wypełniają ilościową lukę informacyjną na temat ilościowej fragmentacji strugi cieczy wprowadzanej w przepływ gazu. Stanowią także odniesienie do kalibracji modelu numerycznego przepływu dwufazowego powietrze – aerozol wody skondensowanej. Uzyskane wyniki skłaniają także do podjęcia dodatkowych badań nawadniania w warunkach obniżonej wartości temperatury na potrzeby opisu efektów oblodzenia elementów konstrukcyjnych statku powietrznego.

Wnioski pozwalają na dokonanie oceny niezgodności dotyczących odwzorowywania warunków atmosferycznych. Daje to możliwość oceny wiarygodności badań prowadzonych z wykorzystaniem tunelu w zakresie jakościowym, ale również wskazuje na brak możliwości pełnego odtworzenia pełnej gamy zjawisk atmosferycznych.

Badanie wpływu zmian rozmiaru szczeliny powietrznej między ubraniem ochronnym a symulatorem skóry na intensywność wymiany ciepła w trakcie wymuszenia radiacyjnego

JAKUB KOTYŃSKI, MATEUSZ WENDOŁOWICZ
ŁUKASZ CIEŚLIKIEWICZ, PIOTR ŁAPKA

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Instytut Techniki Cieplnej
ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa
e-mail: jakub.kotynski.stud@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: czas powstawania oparzeń, środki ochrony osobistej, ruchoma szczelina powietrzna, radiacyjna wymiana ciepła

W artykule opisano wyniki badań eksperymentalnych, w których sprawdzano wpływ zmiennej szerokości szczeliny powietrznej pomiędzy materiałem symulującym ludzką skórę a wielowarstwowym ubraniem ochronnym, złożonym z warstwy wierzchniej, membrany paroizolacyjnej, izolacji termicznej i podszewki. Materiał symulujący skórę (fotoutwardzalna żywica) wybrano na podstawie badań własnych, przyjmując jako kryterium odniesienie do efuzyjności skóry ludzkiej. Do zasymulowania zmian szerokości szczeliny powietrznej wykorzystano poruszający się sinusoidalnie wymiennik ciepła, z zamontowanym symulatorem skóry. Wyjściowe szerokości szczelin powietrznych, wokół których wykonywano oscylacje, wynosiły: 6.4 mm – wartość normatywna, 3.2 i 9.6 mm. Wymiennik był utrzymywany w stałej temperaturze 37°C, odpowiadającej temperaturze wnętrza ciała. W celu symulacji obciążenia radiacyjnego wykorzystano promienniki podczerwieni, których moc można było regulować w zakresie 0–18 kW. Na potrzeby eksperymentu przyjęto dwa poziomy gęstości radiacyjnego strumienia ciepła docierającego do powierzchni ubrania ochronnego: 7.5 i 12.5 kW/m^2. Zgodnie z założeniami wybranego modelu oparzenia powstają, gdy temperatura na granicy pomiędzy naskórkiem a skórą właściwą osiągnie 44°C. W eksperymencie granicy tej odpowiadał interfejs między wymiennikiem ciepła a symulatorem skóry. W trakcie badań bezpośrednio mierzone były temperatury na interfejsie wymiennika ciepła i warstwy imitującej skórę, na powierzchni tej warstwy oraz pomiędzy poszczególnymi warstwami ubrania ochronnego. Na interfejsie wymiennika ciepła i warstwy imitującej skórę oraz powierzchni ubrania ochronnego mierzona była również gęstość strumienia ciepła. Zmierzone w ten sposób parametry posłużyły do wyznaczenia czasów, po których dochodzi do poparzeń II stopnia według trzech kryteriów: Stolli, Henriquesa oraz HTI.

Spectral entropy as a measure of the effectiveness of internally mounted pressure pulsation dampers

PRZEMYSŁAW MŁYNARCZYK, MICHAŁ PRĄCIK
Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny
Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków
e-mail: pmlynarczyk@pk.edu.pl

Keywords: spectral entropy, pressure pulsations, FFT spectrum, shaped nozzles, signal analysis

This study investigates the usefulness of spectral entropy as an indicator of the effectiveness of internal pressure pulsation dampers in compressor installations. The analysis was based on FFT spectra of pulsations recorded at different compressor rotational speeds – first without the damper and then with the internal edamper installed. Spectral entropy was defined as a measure of the disorder in the amplitude distribution of the frequency spectrum, derived from normalized probabilities of spectral amplitudes.

Spectral entropy was selected as a potential parameter for evaluating the influence of pulsation dampers on pressure pulsations due to the relationship described in the literature between this quantity and the intensity of turbulence in fluid flow, as well as its established use in vibration signal analysis to characterize the principal features of mechanical vibrations. The attenuation of pressure pulsations in compressor discharge manifolds can modify both the distribution and the relative contribution of individual harmonics within the signal spectrum, and consequently, the overall level of spectral "orderliness." Therefore, examining changes in spectral entropy may serve as a measure of the reduction of spectral disorder after the application of a damper in the compressor manifold, and may also assist in assessing the damper's influence on the attenuation or amplification of high-frequency harmonics.

Initially, maximum spectral entropy values were compared using all amplitude components of the FFT spectra. The results of this approach did not allow for a clear assessment of whether spectral entropy could serve as a reliable indicator of pulsation eliminator performance. Therefore, a second analysis was carried out, this time including only those spectral components whose amplitudes exceeded an arbitrary predefined threshold values, established as the noise level of the measured pulsation signals. When this cutoff was applied, the differences observed between the system operating with and without the eliminator became more distinct and consistent.

The conclusions drawn from the analysis may indicate that only the application of a noise-level cutoff enables spectral entropy to be considered a potentially effective measure of internal pulsation damper performance.

Wpływ zestrojonego tłumika masowego, mocowanego wewnątrz rurociągu, na tłumienie pulsacji ciśnienia i wibracji rurociągu w instalacji sprężarki tłokowej

JAROSŁAW BŁĄDEK, PRZEMYSŁAW MŁYNARCZYK
Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny
al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków
e-mail: jaroslaw.bladek@pk.edu.pl, przemyslaw.mlynarczyk@pk.edu.pl

Słowa kluczowe: Tłumienie pulsacji ciśnienia, tłumienie drgań rurociągów, sprężarka wyporowa

Zjawisko pulsacji ciśnienia stanowi jedno z kluczowych zagadnień w eksploatacji układów sprężarkowych i rurociągowych. Pulsacje te powstają głównie w wyniku cyklicznej pracy elementów maszyn przepływowych, takich jak sprężarki tłokowe, oraz oddziaływania dynamicznego przepływu gazu w instalacji. Ich obecność prowadzi do generowania fal akustycznych, które w przypadku nakładania się z częstotliwościami własnymi układu mogą wywoływać rezonans. W rezultacie dochodzi do znacznego wzrostu amplitudy drgań, co skutkuje nie tylko podwyższonym poziomem hałasu, lecz także poważnym obciążeniem zmęczeniowym rurociągów i armatury. Niekontrolowane pulsacje są jedną z głównych przyczyn awarii oraz skrócenia trwałości elementów instalacji.

Przeprowadzono badania które pozwoliły ocenić wpływ dysz o złożonej geometrii, mocowanych wewnątrz rurociągu na sprężynach, na pulsacje ciśnienia oraz wibracje rurociągu. Zaletą tej koncepcji jest możliwość jednoczesnego tłumienia dominującej częstotliwości rezonansowej instalacji oraz redukcji pulsacji w szerokim zakresie częstotliwości. Umieszczenie takich elementów bezpośrednio wewnątrz rurociągu stanowi innowacyjne podejście, które łączy cechy klasycznych tłumików rezonansowych i nowoczesnych struktur adaptacyjnych, otwierając nowe perspektywy dla badań nad skuteczną redukcją drgań w instalacjach przemysłowych.

Wykonano badania trzech tłumików w opcjach dostrojonych do różnych częstotliwości pulsacji generowanych przez sprężarkę oraz ich sztywnych odpowiedników, w pełni wykonanych za pomocą druku 3D. Tłumiki sztywne miały za zadanie sprawdzenie wpływu samego kształtu wprowadzonego wewnątrz instalacji na badane parametry. Tłumiki elastyczne zostały wykonane w formie drgającej masy na sprężynach stalowych. Masy elementów i sztywności sprężyn zostały dobrane tak aby ich częstość wdrgań własnych odpowiadała zadanym częstotliwościom pulsacji pochodzącym od sprężarki tj. 18,5 Hz, 27 Hz i 35 Hz. Te częstotliwości odpowiadają pulsacjom generowanym przez sprężarkę dla prędkości obrotowej 1100 obr/min 1600 obr/min i 2100 obr/min.

Dla dwóch przypadków wynik jest bardzo obiecujący. Pozostałe przypadki pomimo tłumienia w mniejszym lub w większym zakresie nie obrazują tak wyraźnie oczekiwanego efektu. Może to wynikać z faktu częściowego rozminięcia się częstości własnej układu z deklarowaną oraz ze sposobu pracy sprężarki, który nie pozwalał na idealne nastawienie prędkości obrotowej a jedynie nadążne sterowanie dążące do zdefiniowanej wartości. Każdorazowo jednak tłumienie wibracji było większe dla zestrojonego tłumika pod konkretną częstotliwość niż jego sztywnego odpowiednika geometrycznego.

Enhancement of thermal efficiency in a germicidal chamber using white-light-irradiated gold nanorods

PIOTR RADOMSKI, PAWEŁ ZIÓŁKOWSKI, DARIUSZ MIKIELEWICZ

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechnicznej i Okrętownictwa
ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: piotr.radomski@pg.edu.pl

Keywords: thermal efficiency, gold nanorods, light irradiation, germicidal chamber

Since the outbreak of the COVID-19 pandemic, UV irradiation has been widely investigated as a method for pathogen disinfection. However, its reduced effectiveness in water compared to air limits its applicability in food sterilization. As a result, thermal inactivation has emerged as a great alternative, particularly for emerging and previously unknown pathogens. A key challenge, however, is obtaining rapid temperature increase, which typically requires high power input and leads to higher energy costs.

On the other hand, gold nanoparticles offer a potential solution due to their efficient light-to-heat energy conversion thanks to the plasmon resonance. While spherical gold nanoparticles exhibit a single transverse absorption peak at green region (approximately 520 nm), gold nanorods display an additional longitudinal peak that can be tuned by adjusting their aspect ratio during synthesis, enabling enhanced photothermal performance in the whole range of visible light.

Hence, to reduce the required energy cost and to compare the heating methods, an LED lamp and a hot plate delivering a comparable heat flux (60 $W \cdot cm^{-2}$) were applied to a 3D-printed, shape-optimized germicidal chamber with a descending stepped platform. Moreover, to further enhance the temperature rise, gold nanorods of 46 nm in diameter and 104 nm in length, exhibiting strong absorption at their plasmon resonance maxima (520 and 695 nm), were deposited and functionalized on the stepped platform surface. The experiments were measured with a thermal camera after calibration of emissivity, and two thermocouples of a type K, calibrated with resistant thermometers with an accuracy 0.1°C.

The results demonstrate that incorporating gold nanorods increased the maximum temperature from 65 °C in the bare illuminated chamber to 130 °C in the gold nanorod-based system, exceeding the boiling point of water and additionally enhancing heat transfer within the chamber. The experimental study was further supported by numerical analysis to predict the energy conversion and heat transfer mechanisms, and to optimize the chamber geometry and materials properties for practical applications.

This research of Gdańsk University of Technology was supported in part by the National Science Center in Poland under the project "Shape and displacement optimization of gold nanorods in the killing chamber in order to phototermoablation processes", no. UMO-2021/43/D/ST8/02504.

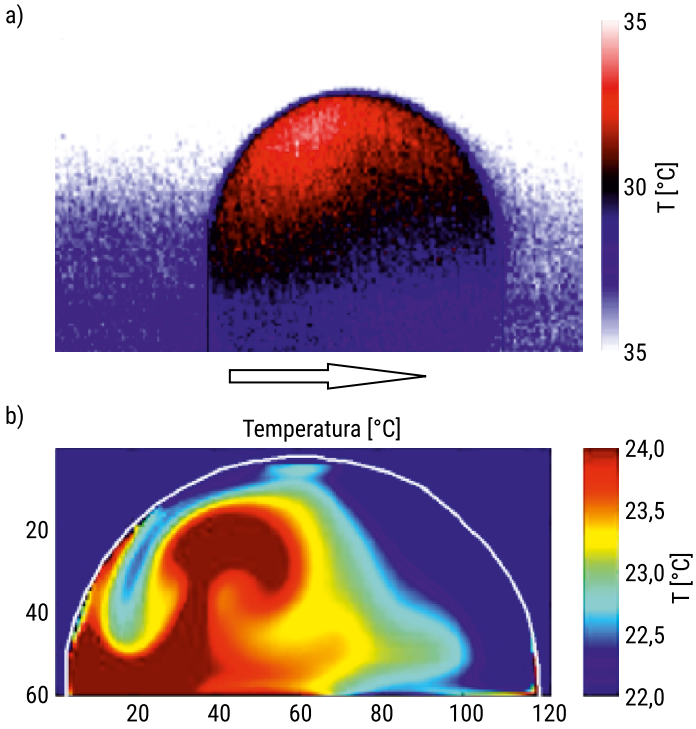
Zastosowanie metody lattice-Boltzmann (LBM) do modelowania przepływu w kropli przewodzącej cieczy w eksperymencie EWOD

ROMUALD MOSDORF, PIOTR MROZEK, GABRIELA RAFAŁKO

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny,
ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok
e-mail: gabriela.rafalko@pb.edu.pl

Słowa kluczowe: modelowania przepływu cieczy, metoda LBM, układ elektrohydrodynamiczny, elektrozwilżanie

W pracy zastosowano metodę LBM (lattice-Boltzmann) do modelowania przepływu w kropli przewodzącej cieczy (wody) w eksperymencie EWOD. Analizowano przepływ cieczy opisany równaniami Naviera Stokesa z uwzględnieniem transportu ciepła opisanego równaniem adwekcji–dyfuzji temperatury. Rozpatrywano układ elektrohydrodynamiczny, w którym kropla słabo przewodzącej wody spoczywa na warstwie dielektrycznej pokrywającej elektrody umieszczone pod nią. Elektrody są zasilane napięciem stałym (DC) lub przemiennym (AC), generując pole elektryczne w objętości kropli. Pole to oddziałuje z ruchliwymi nośnikami ładunku (jonami) obecnymi w wodzie, prowadząc do powstania sił objętościowych, które indukują ruch wody. W pracy porównano wyniki badań eksperymentalnych z wynikami symulacji – uzyskano jakościową zgodność wyników symulacji z wynikami eksperymentalnymi. W badaniach eksperymentalnych ruch wody w kropli obserwowano pośrednio poprzez pomiar zmian temperatury powierzchni kropli. Na rys.1 pokazano przykładowy obraz zmian temperatury powierzchni kropli oraz wyniki symulacji zmian temperatury w dwuwymiarowym przekroju kropli.



Rys.1. Przepływ wody w kropli w eksperymencie EWOD. a) obraz z kamery termowizyjnej – kropla przemieszcza się zgodnie z kierunkiem strzałki – ciepła ciecz przemieszcza się po powierzchni kropli, b) przykładowe wyniki symulacji mieszania się wody w kropli.

Entropia ruchu kropli wody w trakcie eksperymentu elektrozwilżania (EWOD)

ARTUR NOWICKI[1], *GABRIELA RAFAŁKO*[1]
ROMUALD MOSDORF[1], *PIOTR MROZEK*[2]

[1] Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny
ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok
[2]Bialystok University of Technology, Institute of Biomedical Engineering
Faculty of Mechanical Engineering
Wiejska 45A, 15-351, Bialystok
e-mail: artur.nowicki.111488@student.pb.edu.pl

Słowa kluczowe: elektrozwilżanie, dynamika kropli, entropia Shannona

Eksperyment elektrozwilżania na dielektryku (EWOD) umożliwia sterowanie ruchem kropli wody destylowanej poprzez zmianę napięcia elektrycznego, które wpływa na kąt zwilżania powierzchni. Dynamika ruchu kropli ma jednak złożony charakter, ponieważ zależy od wielu czynników, takich jak wartość i częstotliwość napięcia, właściwości powierzchni, siły lepkościowe oraz oddziaływania międzyfazowe. Badanie ruchu kropli, jego dynamiki i złożoności w trakcie eksperymentów EWOD może stać się wyznacznikiem jakości powierzchni czy odpowiedniego dobrania parametrów eksperymentalnych. W pracy zidentyfikowano wydłużenie kropli w trakcie każdego przejścia kropli z jednej elektrody na drugą, a następnie obliczono prędkości i entropię Shannona wydłużenia kropli.

Optymalizacja Bayesowska w zagadnieniach odwrotnych do wyznaczenia parametrów krzywych sorpcji GAB

SZYMON ZDZIARSKI, MICHAŁ WASIK, PIOTR ŁAPKA

Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Cieplnej
ul. Nowowiejska 21/25, 00-661 Warszawa
e-mail: piotr.lapka@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: metoda odwrotna, symulacje numeryczne, materiały budowlane, optymalizacja Bayesowska, transport ciepła i wilgoci

Wiarygodne symulacje procesów cieplno-wilgotnościowych w materiałach budowlanych zawierających biododatki wymagają dokładnego wyznaczenia izotermy sorpcji. Standardowe metody grawimetryczne określania tego parametru są niezwykle czasochłonne, dlatego konieczny jest rozwój technik modelowania z wykorzystaniem rozwiązań zagadnień odwrotnych. Podejście to polega na sprzężeniu dynamicznych eksperymentów z modelami numerycznymi w celu identyfikacji właściwości materiałowych poprzez minimalizację błędu między wynikiem symulacji a pomiarem. Prowadzi to jednak do kosztownych obliczeniowo problemów optymalizacyjnych. Niniejsza praca przedstawia metodykę bazującą na zastosowaniu ewolucyjnych strategii optymalizacyjnych (ES) do optymalizacji Bayesowskiej (BO) w celu wyznaczania parametrów modelu izotermy sorpcji Guggenheima-Andersona-de Boera (GAB). W badaniach wykorzystano uproszczony izotermiczny model wymiany ciepła, powietrza i wilgoci w materiale budowlanym zaimplementowany w programie ANSYS Fluent. Model ten uwzględnia dyfuzję powietrza i pary wodnej w materiale oraz transport wilgoci między powietrzem a materiałem stałym, który opisano za pomocą liniowego modelu kinetyki sorpcji. Kluczowym elementem pracy było zaproponowanie integracji biblioteki Optuna ze środowiskiem PyFluent. Funkcję kosztu zdefiniowano jako sumę znormalizowanych błędów średniokwadratowych z zastosowaniem zależnych od czasu wag (kar), co pozwoliło na efektywne dopasowanie rozwiązania w krytycznych obszarach, takich jak początkowe tempo dyfuzji pary czy szczytowe nasycenie wilgocią. Wyniki pokazały, że BO znacząco przewyższa populacyjny algorytm Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES) pod względem dokładności i szybkości zbieżności. Algorytm BO z powodzeniem odtworzył parametry bazowe osiągając po 150 iteracjach dokładność o rząd wielkości wyższą niż CMA-ES. W przeciwieństwie do stabilnego BO, algorytm CMA-ES wykazał znaczny rozrzut wyników i trudności z opuszczeniem minimów lokalnych. Zaproponowane sprzężenie Optuna-PyFluent stanowi solidne, skalowalne i wysoce efektywne środowisko dla dowolnych symulacji ANSYS Fluent traktowanych jako model typu „czarna skrzynka".

Determination of 2D transient temperature distribution in a horizontal chamber cross-section using transient outer surface measurements

JAN TALER[1], KAROL KACZMARSKI[1,2]
DAWID TALER[2], PIOTR DZIERWA[2], MARCIN TROJAN[2]

[1] Cracow University of Technology, Faculty of Environmental Engineering and Energy, Department of Energy
[2] Cracow University of Technology, Faculty of Environmental Engineering and Energy
Department of Thermal Engineering and Air Protection
ul. Warszawska 24, 31-155 Krakow
e-mail: karol.kaczmarski@pk.edu.pl

Keywords: Monitoring of pressure components, Inverse Heat Conduction Problem (IHCP), Thick-walled components, Non-invasive thermal monitoring,

The paper presents an indirect, non-invasive method for determining the two-dimensional transient temperature distribution in the cross-section of thick-walled components. The proposed approach is based on the solution of the inverse heat conduction problem (IHCP), utilizing only transient temperature measurements recorded on the easily accessible outer surface of the component. This technique is of critical importance in industries where the installation of internal sensors is prohibited or technically unfeasible, particularly in the case of nuclear power plant components, high-pressure steam headers, and large-scale chemical reactors.

The mathematical model employs a numerical-analytical approach to reconstruct the thermal state of the wall without the need for drilling holes or disturbing the structural integrity of the pressure-retaining parts. To ensure the stability and accuracy of the inverse solution, which is inherently ill-posed, the time step with which the temperature and stress fields are determined should be appropriately large. This method is particularly effective in monitoring components subjected to slow or moderate changes in the temperature of the flowing fluid, where thermal inertia plays a significant role.

The accuracy and stability of the developed method were verified through numerical simulations and sensitivity analyses, considering the impact of measurement errors and sensor placement. The results show that the proposed non-invasive monitoring technique provides a reliable basis for calculating thermal stresses. This approach significantly contributes to the safety and optimization of power plant operation, providing high-quality temperature data on the inner surface using only sensors placed on the outer surface. The method is particularly useful for pressure components in nuclear power plants, where drilling into the wall to place sensors is inadmissible.

Model HEL do odwzorowania ruchu czerwonych krwinek (RBC) w sąsiedztwie płatków zastawki serca

WOJCIECH ADAMCZYK[1], KAROLINA BIGAJ[1], TOMASZ KRYSIŃSKI[1]
ZBIGNIEW BULIŃSKI[1], MAREK ROJCZYK[1], SZYMON CABAN[1], ADAM GOLDA[2]

[1] Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
[2]Szpital Miejski nr 4, Oddział Kardiologii
Gliwice, 44-100, Polska
e-mail: wojciech.adamczyk@polsl.pl

Słowa kluczowe: model wielofazowy, czerwone krwinki, modelowanie CFD, podejście Euler–Lagrange

Dokładne odwzorowanie efektów hemodynamicznych jest kluczowe dla zrozumienia degradacji wpływającej na działanie zastawki. Nieprawidłowy przepływ krwi w pobliżu płatków zastawki może inicjować tworzenie skrzepów poprzez narażenie komórek na wysokie naprężenia ścinające, uszkodzenie erytrocytów oraz aktywację płytek krwi. Takie naprężenia często wynikają z recyrkulacji lub obszarów zastoju przepływu. Analiza tych struktur przepływu umożliwia oszacowanie naprężeń działających na pojedyncze erytrocyty, a w połączeniu z ich charakterystykami wytrzymałościowymi — określenie prawdopodobieństwa hemolizy, będącej czynnikiem inicjującym proces zakrzepowy.

Podczas implantacji bioprotez zastawkowych metodą TAVI jednym z możliwych przyczyn uszkodzenia jest zakrzepica płatków, która może wynikać ze zastoju krwi lub turbulencji związanych z degradacją strukturalną lub niestrukturalną.

Nasze działania w tym obszarze koncentrują się na opracowaniu modelu łączącego niskopoziomowy, model elementów dyskretnych (DEM) do przewidywania interakcji erytrocytów z hybrydowym podejściem Euler–Lagrange (HEL), służącym do modelowania przepływu erytrocytów jako przepływu ziarnistego. Integracja modeli zostanie zrealizowana poprzez model zastępczy opracowany w ramach podejścia AI/ML.

W niniejszej pracy chcielibyśmy przedstawić hemodynamikę w pobliżu płatka zastawki, wykorzystując ziarniste hybrydowe podejście Euler–Lagrange (HEL) do symulacji ruchu erytrocytów. Stanowi to wstępny krok w kierunku opracowania w pełni funkcjonalnej metodologii umożliwiającej efektywne sprzężenie wyników symulacji CFD-DEM o wysokiej rozdzielczości z uproszczonymi symulacjami CFD-DEM wykonywanymi metodą HEL.

Niniejsze badania zostały przeprowadzone w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki na podstawie umowy DEC-2024/54/E/ST8/00100

Egzotermiczne utlenianie stopów cyrkonu parą wodną jako sprzężone źródło ciepła i wodoru w wodnych reaktorach jądrowych – model uproszczony

KACPER BURY[1], *TOMASZ BURY*[2]

[1] Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
[2] Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
e-mail: kacper.bury42@student.pk.edu.pl, tomasz.bury@polsl.pl

Słowa kluczowe: utlenianie cyrkonu, LOCA, AP1000, kinetyka paraboliczna, generacja wodoru

Podczas awarii utraty chłodziwa (Loss-of-Coolant Accident - LOCA) w wodnych reaktorach jądrowych wzrost temperatury koszulek paliwowych wykonanych ze stopów cyrkonu inicjuje reakcję utleniania parą wodną: $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$. Proces ten ma charakter silnie egzotermiczny i w warunkach wysokotemperaturowych stanowi istotne, dodatkowe źródło entalpii w bilansie energii rdzenia w fazie nagrzewania powyłączeniowego. Jednocześnie generowany wodór wpływa na bilans masy i warunki termodynamiczne w obudowie bezpieczeństwa.

W pracy opracowano skupiony model 0D opisujący sprzężenie kinetyki chemicznej z bilansem energii fragmentu pręta paliwowego. Narastanie warstwy tlenkowej przyjęto w postaci prawa parabolicznego, natomiast stałą kinetyczną opisano równaniem Arrheniusa. Strumień ciepła reakcji wyznaczono na podstawie entalpii reakcji i chwilowej szybkości utleniania, wprowadzając go jako człon źródłowy do równania bilansu energii koszulki. Takie sformułowanie pozwala bezpośrednio wyznaczać chwilową moc chemiczną procesu jako funkcję temperatury oraz parametrów kinetycznych, a także jej wpływ na dynamikę wzrostu temperatury.

Wykazano, że ze względu na wykładniczą zależność szybkości reakcji od temperatury układ ma charakter silnie nieliniowy, a w określonym zakresie parametrów możliwe jest dodatnie sprzężenie cieplno-chemiczne prowadzące do gwałtownego przyspieszenia procesu. Oznacza to, że składnik entalpiowy związany z reakcją $Zr–H_2O$ może stanowić istotny element całkowitego bilansu energii w fazie nagrzewania rdzenia.

Opracowany model zaimplementowano numerycznie i wykorzystano do symulacji wybranego scenariusza LOCA w obudowie bezpieczeństwa reaktora AP1000, uwzględniając uproszczony bilans masy wodoru. Uzyskane wyniki potwierdzają kluczową rolę procesów termochemicznych w kształtowaniu warunków cieplnych i składu gazowego podczas stanów awaryjnych.

Przedstawione podejście umożliwia spójną termodynamicznie ocenę roli egzotermicznego utleniania w globalnym bilansie energii i masy oraz stanowi podstawę do dalszych analiz sprzężonych procesów chemicznych i transportowych.

Analiza właściwości ablacyjnych kompozytu proszkowego modyfikowanego aerożelem, montmorylonitem i mullitem

ROBERT SZCZEPANIAK[1], PRZEMYSŁAW KULIK[2]

[1] Lotnicza Akademia Wojskowa, Wydział Lotnictwa
ul. Dywizjonu 303 35, 08-521 Dęblin
[2] 49 Baza Lotnicza
ul.Powstańców Warszawy 28B, 83-000 Pruszcz Gdański
e-mail: r.szczepaniak@law.mil.pl, przemyslaw3874@gmail.com

Słowa kluczowe: ablacja, aerogel, montmorylonit, mullit, kompozyt proszkowy

Artykuł przedstawia analizę właściwości ablacyjnych kompozytów proszkowych przeznaczonych do zastosowań termoochronnych. Zjawisko ablacji, będące procesem stopniowego niszczenia materiału pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury, płomienia oraz strumienia ciepła, odgrywa istotną rolę w ochronie elementów pracujących w ekstremalnych warunkach cieplnych. Materiały ablacyjne znajdują szerokie zastosowanie m.in. w przemyśle lotniczym, kosmicznym oraz energetycznym, gdzie wymagana jest skuteczna ochrona konstrukcji przed degradacją termiczną. W badaniach ablacyjnych szczególne znaczenie mają kompozyty proszkowe, których właściwości można modyfikować poprzez odpowiedni dobór dodatków ceramicznych i izolacyjnych wpływających na przewodnictwo cieplne, odporność ogniową oraz stabilność strukturalną materiału. Przedmiotem badań były cylindryczne próbki wykonane na bazie żywicy epoksydowej L285 MGS z utwardzaczem H285 MGS, wzmacniane sproszkowanymi materiałami odpornymi na wysoką temperaturę, takimi jak aerożel, montmorylonit oraz mullit. Celem pracy była ocena wpływu rodzaju dodatku oraz konfiguracji warstw materiałowych na właściwości termoochronne i odporność ablacyjną kompozytów podczas oddziaływania płomienia. Analiza wyników wykazała istotny wpływ zastosowanych dodatków na przebieg procesu ablacji oraz rozkład temperatur w strukturze materiału. Najmniejszą masową szybkość ablacji uzyskano dla próbki zawierającej warstwy aerożelu, natomiast największą dla próbki wykonanej wyłącznie z żywicy epoksydowej. Najwyższą temperaturę powierzchni ablacyjnej zarejestrowano dla próbek zawierających montmorylonit, co świadczy o ich wysokiej odporności na bezpośrednie oddziaływanie płomienia. Jednocześnie zaobserwowano, że próbki osiągające wyższe temperatury warstwy ablacyjnej wykazywały wolniejsze tempo przepalania oraz skuteczniej ograniczały degradację materiału. Wyniki badań potwierdziły również, że kolejność ułożenia poszczególnych warstw materiałowych ma znaczący wpływ na właściwości termoochronne kompozytów. Najkorzystniejsze parametry uzyskano dla układów warstwowych o zróżnicowanych właściwościach materiałowych, natomiast obecność sąsiadujących warstw o identycznym

składzie prowadziła do pogorszenia odporności termicznej. Szczególnie korzystne właściwości izolacyjne wykazał aerożel, który ograniczał wzrost temperatury w głębszych warstwach materiału. Uzyskane rezultaty wskazują, że odpowiedni dobór oraz konfiguracja dodatków proszkowych mogą istotnie zwiększyć skuteczność ochrony termicznej kompozytów ablacyjnych stosowanych w warunkach oddziaływania wysokich temperatur.

Pomiar temperatury za pomocą nowego termometru w masywnej osłonie w zmiennych warunkach przepływowych przy wykorzystaniu metody odwrotnej

MAGDALENA JAREMKIEWICZ, MAREK MAJDAK
Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: magdalena.jaremkiewicz@pk.edu.pl

Słowa kluczowe: pomiar temperatury, stan nieustalony, metoda odwrotna, metoda objętości skończonych

W pracy przedstawiono oraz zweryfikowano eksperymentalnie metodę odwrotną kroczącą wykorzystaną do pomiaru nieustalonej temperatury płynu za pomocą masywnych termometrów o masywnej obudowie. Metoda opiera się na pomiarze temperatury w osi cylindra stanowiącego część obudowy termometru, w którym wydrążono otwór o małej średnicy w celu umieszczenia w nim termopary. Znane są zatem dwa warunki brzegowe w osi cylindra, które pozwalają na rozwiązanie odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła. Metoda wykorzystuje metodę objętości kontrolnych. Krocząc z objętości kontrolnej w osi termometru w kierunku brzegu obudowy, wyznaczana jest temperatura jej powierzchni zewnętrznej. Na podstawie bilansu energii dla objętości kontrolnej na brzegu obudowy oraz współczynnika wnikania ciepła wyznaczanego z korelacji na liczbę Nusselta znanej z literatury określana jest temperatura płynu. Metoda została najpierw zweryfikowana na podstawie testu obliczeniowego dla skokowej zmiany temperatury płynu, gdzie z rozwiązania bezpośredniego zagadnienia przewodzenia ciepła, dla zadanego współczynnika przejmowania ciepła, uzyskano temperaturę w osi termometru, a następnie z rozwiązania zagadnienia odwrotnego z powrotem temperaturę płynu. Zbadano wpływ kroku czasowego oraz liczby objętości kontrolnych na dokładność przedstawionej metody, również w przypadku, gdy dane wejściowe zostały zaburzone błędami przypadkowymi. Następnie metoda została zweryfikowana na stanowisku laboratoryjnym, na którym przebadano termometry o różnych średnicach. Stanowisko składa się z długiego prostego kanału, przez który przepływa powietrze nagrzewane w nagrzewnicy elektrycznej, a przepływ wymuszony jest przez wentylator. Zarówno prędkość przepływającego powietrza jak i moc nagrzewnicy mogą być regulowane. Kształt i długość kanału pozwalają uzyskać przepływ rozwinięty hydraulicznie i termicznie. Temperaturę powietrza w warunkach nieustalonych określono na podstawie przedstawionej metody odwrotnej, a następnie porównano ją z temperaturą zmierzoną w tym samym czasie za pomocą cienkiej termopary

płaszczowej. Sprawdzono również, czy wybór najbardziej korzystnego podziału na objętości kontrolne i kroku czasowego w teście obliczeniowym pokrywa się z wynikami uzyskanymi podczas weryfikacji eksperymentalnej.

Simulation of He II Thermal Counterflow around Cylinders

MARCIN OPALSKI, PRZEMYSŁAW BŁASIAK, SŁAWOMIR PIETROWICZ

Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical and Power Engineering
Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
e-mail: slawomir.pietrowicz@pwr.edu.pl

Keywords: He II, superfluid helium, thermal counterflow, mutual friction, Gorter–Mellink, OpenFOAM

Below the λ-transition, which occurs at approximately 2.17 K, liquid helium enters the He II state. In this regime, heat transport and fluid motion are inseparable in a very literal sense, the dominant mechanism that carries heat is not longer classical diffusion, but a coupled motion of two interpenetrating components.

In the two-fluid description introduced by L. Tisza and further developed by L. Landau and I. Khalatnikov, the normal component carries entropy and behaves viscously, while the superfluid component is inviscid. When heat is supplied, the normal component is driven along the temperature gradient and the superfluid component moves in the opposite direction so that the total mass flow can remain constrained. The resulting counterflow produces mutual friction, which acts as a nonlinear resistance and ties temperature gradients directly to the momentum balance.

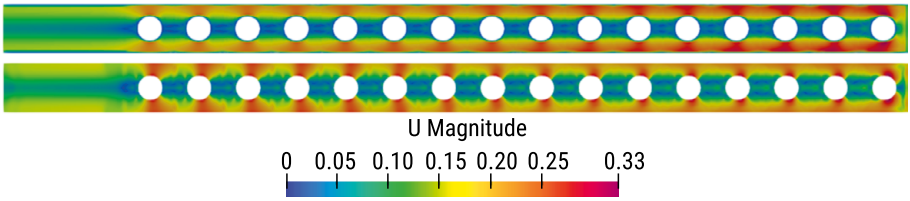
In our study, a simplified numerical model for steady-state conditions, implemented within the OpenFOAM environment. The model assumes that the superfluid momentum balance is dominated by the thermo-mechanical effect, the pressure gradient, and the Gorter-Mellink mutual friction. This leads to a simplified governing equation:

$$s\nabla T = \frac{1}{\rho} p - A\rho_n \left|u_n - u_s\right|^2 \left(u_n - u_s\right)$$

where A is the Gorter-Mellink parameter, and u_n and u_s represent the normal and superfluid velocity vectors, respectively. This formulation allows for the algebraic determination of the counterflow velocity

$$u_n - u_s = -\left(\frac{s}{A\rho_n \left| -\frac{1}{\rho s}\nabla p + \nabla T \right|^2} \right)^{\frac{1}{3}} \left(-\frac{1}{\rho s}\nabla p + \nabla T \right)$$

The presented results focus on He II flow in a cylinder-array geometry relevant to superconducting-magnet cooling concepts. The computed velocity magnitude field shows regions of enhanced counterflow intensity around the cylinders and in the wakes. Within the adopted model, the Gorter–Mellink mutual-friction term provides a nonlinear resistance, coupling the driving ∇T and ∇p to the resulting counterflow.



Velocity magnitude contours: top – normal component, bottom – superfluid component

Computational Analysis of Moist Airflow Distribution in Underground Mine Roadways

KAMIL ŚMIERCIEW, JERZY GAGAN, DARIUSZ BUTRYMOWICZ

Bialystok University of Technology
Wiejska 45C, Białystok, 15-351, Poland
e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Keywords: mine ventilation; CFD; moist airflow; species transport; underground thermal comfort

Assessing thermal comfort and microclimatic conditions in underground mine workings requires a reliable description of the local airflow structure, yet direct measurements are typically limited to a small number of cross-sections and cannot resolve the flow field within the roadway network. This paper presents a CFD-based investigation of moist airflow distribution in a section of an underground mine ventilation network, developed from field measurement data and a geometric model of the facility supplied in .step format.

Due to the limited availability of geometric and measurement data, a simplified computational domain was adopted, comprising only the airflow volume within a truncated fragment of the roadway network. Differences between the actual roadway cross-sections and the idealised CFD geometry made a pointwise comparison of local velocities unreliable; the preservation of the air mass flow rate was therefore adopted as the primary validation criterion, with local velocities treated as resultant quantities recalculated with respect to the true and modelled cross-sectional areas.

The analysis was performed in two stages. A baseline dry-airflow model was first validated against measured velocity, temperature and mass flow rate at two reference cross-sections, followed by a moist-airflow simulation incorporating water vapour transport. Very good agreement with measurements was obtained for area-averaged velocity, temperature, relative humidity and mass flow rate, with deviations remaining within typical measurement and numerical uncertainty. Detailed analysis of a target cross-section located downstream of a bend and upstream of a ventilation branch split revealed a strongly non-uniform flow structure, with a distinct high-velocity core and near-wall low-velocity zones resulting from the upstream bend and asymmetric inflow; no global flow reversal was identified.

The results provide a validated, physically consistent baseline airflow model for the analysed mine section and establish a reference framework for subsequent work, including the incorporation of rock-mass heat exchange, technological heat and moisture sources, and the evaluation of thermal comfort indices for underground working conditions.

Hydraulic Maldistribution and Manifold Redesign in a Two-Phase Minichannel Heat Exchanger: A CFD Study

KAMIL ŚMIERCIEW, JERZY GAGAN, DARIUSZ BUTRYMOWICZ
MICHAŁ ŁUKASZUK, ANDRZEJ PAWLUCZUK, ADAM DUDAR

Bialystok University of Technology
Wiejska 45C, Białystok, 15-351, Poland
e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Keywords: minichannel heat exchanger; manifold hydraulics; flow maldistribution; two-phase CFD; porous zone modelling

Uniform mass flow distribution among parallel minichannels is a prerequisite for stable evaporator performance, yet inlet manifold geometry is frequently designed without a detailed hydraulic assessment, leaving local flow maldistribution and channel-level flow reversal undetected until later stages of development. This paper presents a CFD-based hydraulic analysis of an inlet manifold feeding a minichannel heat exchanger operating with a two-phase propane (R290) flow, aimed at quantifying flow maldistribution and identifying its geometric origin.

Two manifold configurations were investigated under identical boundary conditions. The baseline design, fed through a single inlet along the full channel-pack length, produced a strongly non-uniform distribution: mass flow rates among the eleven outlet channels ranged from 0.00126 kg/s to 0.00245 kg/s, a spread of nearly 95%, and reversed flow (–0.00084 kg/s) was identified in the channel located in the low-pressure end region of the manifold, consistent with a recirculation zone confirmed by streamline analysis. Explicit resolution of the full minichannel length was found to substantially increase computational cost while promoting boundary-condition-induced spurious backflow; representing the channels as porous zones reduced this cost while preserving the correct hydraulic resistance, with a hybrid approach – a short explicit channel entrance coupled to a porous-zone body – providing the best compromise between numerical stability and physical fidelity. For the two-phase flow, a simplified Mixture model failed to yield stable, physically consistent solutions in the presence of multiple outlets and porous zones; only an Eulerian multiphase formulation produced a converged, smooth mass balance (closing to within 10^{-7} kg/s) consistent with independent one-dimensional calculations.

Based on these findings, a modified manifold geometry (Configuration 2), incorporating multi-point feeding and a redesigned manifold base, was developed and shown to substantially improve flow uniformity, yielding a smooth, predictable channel-to-channel mass distribution with only moderate residual asymmetry near the inlet. A sensitivity

analysis of the porous-zone resistance parameters confirmed that the observed distribution pattern is a structural consequence of manifold geometry rather than an artefact of the chosen resistance coefficients.

The results establish a validated modelling framework – combining porous-zone representation with an Eulerian two-phase approach – for the hydraulic design and optimisation of minichannel heat exchanger manifolds, and provide a quantitative basis for geometry modifications that mitigate flow maldistribution and channel-level backflow.


Politechnika
Białostocka
PAN
POLSKA AKADEMIA NAUK
Komitet
Termodynamiki
i Spalania