

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209778

**INVESTIGATION OF STEAM GENERATION PERFORMANCE ON CONICAL CAVITY RECEIVER BY DIFFERENT GEOMETRIC CONCENTRATION RATIOS FOR FRESNEL LENS SOLAR CONCENTRATOR**  
(p. 6–14)

Asrori Asrori

Brawijaya University, Malang, Indonesia  
State Polytechnic of Malang, Malang, Indonesia  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9414-3015>

Sudjito Suparman

Brawijaya University, Malang, Indonesia  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3490-7543>

Slamet Wahyudi

Brawijaya University, Malang, Indonesia  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4479-0895>

Denny Widhiyanuriawan

Brawijaya University, Malang, Indonesia  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5729-4212>

The paper discusses the comparison of the performance of steam generators in large and small receivers, using a Fresnel lens concentrator.

The goal is to get the best value from the efficiency of a steam generator between large and small receivers, with the following task details:

- a) design a conical cavity receiver that has the most efficient geometric concentration ratio;
- b) compare the thermal efficiency of conical cavity receivers that have different geometric concentration ratios;
- c) analyze the potential of the steam energy from the conical cavity receiver produced by the PMMA Fresnel lens concentrator based on the amount of average radiation directly at the study site.

The study uses an experimental field research method, which is conducted outdoors. This research was conducted in the energy conversion laboratory, Universitas Brawijaya (Latitude: 7.9553° S and Longitude: 112.6145° W), in September 2019. The PMMA Fresnel lens is used for the solar thermal concentrators. The two receivers with a conical cavity that were compared were made of copper with a volume of 2 litres and 0.25 litres, respectively. They are coated with a glass wool insulator with a thickness of 10 mm. Direct Normal Irradiance ( $I_b$ ) is measured by a solar power meter. The cup anemometer is used to measure wind speed ( $v_w$ ) around the receiver. Digi-Sense 12 Channel Scanning Benchtop Thermometer connected to the laptop is used to measure temperature. The positions of the four K-type thermocouples are as follows:

- 1) ambient temperature ( $T_a$ );
- 2) focal point temperature ( $T_f$ );
- 3) receiver wall temperature ( $T_r$ );
- 4) steam/water temperature ( $T_w$ ).

A pressure gauge to measure the pressure of the steam that goes to the measuring cup was used. After saturation pressure ( $P_{sat}$ ) has been reached, it will be known from the condensation process through the copper coil, which functions as a condenser.

From the results of the study, the large receivers have specifications  $CR_g=8$  and a volume of 2 litres of water. Whereas, the small receiver is  $CR_g=30$  and 0.25 L. The large receivers can produce steam latent heat energy  $Q_s=1.37$  MJ per cycle with useful efficiency (utilization efficiency)  $\eta_{Th}=31.81$  %. Whereas the small receiver can produce steam energy,  $Q_s=579.17$  kJ per cycle with useful efficiency,  $\eta_{Th}=33.31$  %. Hence, from the two types of conical cavity receivers, small receivers have that higher effectiveness than large ones can be recommended.

**Keywords:** steam performance, Fresnel lens, solar concentrator, conical cavity, receiver, temperature, direct normal irradiation, geometric concentration ratio, latent heat, efficiency.

## References

1. Mohtasham, J. (2015). Review Article-Renewable Energies. *Energy Procedia*, 74, 1289–1297. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.774>
2. Widén, J., Munkhammar, J. (2019). *Solar Radiation Theory*. Uppsala: Uppsala University, 50. doi: <https://doi.org/10.33063/diva-381852>
3. Kalogirou, S. A. (2004). Environmental benefits of domestic solar energy systems. *Energy Conversion and Management*, 45 (18-19), 3075–3092. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.12.019>
4. Mousavi Maleki, S., Hizam, H., Gomes, C. (2017). Estimation of Hourly, Daily and Monthly Global Solar Radiation on Inclined Surfaces: Models Re-Visited. *Energies*, 10 (1), 134. doi: <https://doi.org/10.3390/en10010134>
5. Al-Dabbas, M. A. (2010). The analysis of the characteristics of the solar radiation climate of the daily global radiation and diffuse radiation in Amman, Jordan. *International Journal of Renewable Energy*, 5 (2), 23–38.
6. Scarpa, F., Marchitto, A., Tagliafico, L. (2017). Splitting the solar radiation in direct and diffuse components; insights and constrains on the clearness-diffuse fraction representation. *International Journal of Heat and Technology*, 35 (2), 325–329. doi: <https://doi.org/10.18280/ijht.350213>
7. Law, E. W., Prasad, A. A., Kay, M., Taylor, R. A. (2014). Direct normal irradiance forecasting and its application to concentrated solar thermal output forecasting – A review. *Solar Energy*, 108, 287–307. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.07.008>
8. Geddam, S., Dinesh, G. K., Sivasankar, T. (2015). Determination of thermal performance of a box type solar cooker. *Solar Energy*, 113, 324–331. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.014>
9. Onokwai, A. O., Okonkwo, U. C., Osueke, C. O., Olayanju, T. M. A., A Ezugwu, C., Diarah, R. S. et. al. (2019). Thermal Analysis of Solar Box Cooker in Omu-Aran Metropolis. *Journal of Physics: Conference Series*, 1378, 032065. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/3/032065>
10. Sarbu, I., Sebarchievici, C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability*, 10 (1), 191. doi: <https://doi.org/10.3390/su10010191>
11. Dai, Y., Ma, J. (2017). Efficient Solar Cooling by Using Variable Effect LiBr-H<sub>2</sub>O Absorption Chiller and Linear Fresnel Solar Collector with Cavity Receiver. *Proceedings of SWC2017/SWC2017*. doi: <https://doi.org/10.18086/swc.2017.28.03>
12. Xie, W. T., Dai, Y. J., Wang, R. Z., Sumathy, K. (2011). Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (6), 2588–2606. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.031>

13. Wang, L., Yuan, Z., Zhao, Y., Guo, Z. (2019). Review on Development of Small Point-Focusing Solar Concentrators. *Journal of Thermal Science*, 28 (5), 929–947. doi: <https://doi.org/10.1007/s11630-019-1134-4>
14. Xie, W. T., Dai, Y. J., Wang, R. Z. (2011). Numerical and experimental analysis of a point focus solar collector using high concentration imaging PMMA Fresnel lens. *Energy Conversion and Management*, 52 (6), 2417–2426. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.048>
15. Wang, H., Huang, J., Song, M., Hu, Y., Wang, Y., Lu, Z. (2018). Simulation and Experimental Study on the Optical Performance of a Fixed-Focus Fresnel Lens Solar Concentrator Using Polar-Axis Tracking. *Energies*, 11 (4), 887. doi: <https://doi.org/10.3390/en11040887>
16. Wang, H., Huang, J., Song, M., Yan, J. (2019). Effects of receiver parameters on the optical performance of a fixed-focus Fresnel lens solar concentrator/cavity receiver system in solar cooker. *Applied Energy*, 237, 70–82. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.092>
17. Mawire, A., Taole, S. H. (2014). Experimental energy and exergy performance of a solar receiver for a domestic parabolic dish concentrator for teaching purposes. *Energy for Sustainable Development*, 19, 162–169. doi: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.01.004>
18. Hijazi, H., Mokhiamar, O., Elsamni, O. (2016). Mechanical design of a low cost parabolic solar dish concentrator. *Alexandria Engineering Journal*, 55 (1), 1–11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.028>
19. Mahdi, K., Bellel, N. (2014). Estimation of steam production in a receiver under solar concentrating radiation. *Contemporary Engineering Sciences*, 7, 835–843. doi: <https://doi.org/10.12988/ces.2014.4652>
20. Sanchez Vega, L. R. (2016). Modeling and experimental evaluation of a small-scale fresnel solar concentrator system. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 3 (1). doi: <https://doi.org/10.1186/s40807-016-0021-9>
21. Udawant, R. R., Mohite, K. C., Takwale, M. G. (2016). Study of Performance of Fresnel Lens Solar Concentrator. *International Journal of Energy Engineering*, 6 (1A), 14–22.

DOI: [10.15587/1729-4061.2020.210684](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210684)

#### DEVELOPMENT OF A SOIL REGENERATOR WITH A GRANULAR NOZZLE FOR GREENHOUSES (p. 14–20)

**Irina Boshkova**

Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5989-9223>

**Natalya Volgusheva**

Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>

**Antonina Solodka**

Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4043-7667>

**Ihor Mukminov**

Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3674-9289>

**Oksana Bondarenko**

Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0111-0768>

The results of the development of a regenerative-type heat exchange unit for greenhouses are presented. The creation of a

soil regenerator is conditioned by energy and economic expediency. In spring in the daytime, the air in greenhouses is intensely heated by solar radiation, and at night it can be cooled below the allowable temperature. Heat accumulation during the day and using this heat at night will reduce the need for heaters even to their complete exclusion. The soil regenerator contains a dense layer of granular material that is blown through by the air from the inner space of a greenhouse. This solution makes it possible to intensify significantly the heat exchange. To determine the mean intercomponent heat exchange factor, the empirical dependence, taking into consideration the effect of duration of the heat exchange process, was obtained. We developed the procedure of thermal design calculation of a regenerator, using which the main geometric characteristics of the heat exchange area are determined. The results of the calculation of the soil regenerator for a greenhouse with the surface area of 18 m<sup>2</sup> for the conditions of the warm continental climate were presented. The developed soil regenerator contains 5 channels that are 5.75 m long, filled with rubble. It was obtained that for the average solar radiation flow  $Q_c=2,160$  W and the duration of operation of the soil regenerator  $\tau_s=6$  hours, the accumulated heat at night can be consumed for 2.6 hours at the average ambient temperature  $t_1=7$  °C. As the ambient temperature rises, the time of regenerator operation will increase. The proposed soil regenerator is characterized by the design simplicity and its application will lead to an increase in energy costs to maintain the temperature mode in a greenhouse.

**Keywords:** solar radiation, heat accumulation, heat calculation procedure, factor of intercomponent heat exchange.

#### References

1. Bartzanas, T., Tchamitchian, M., Kittas, C. (2005). Influence of the Heating Method on Greenhouse Microclimate and Energy Consumption. *Biosystems Engineering*, 91 (4), 487–499. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.04.012>
2. Taki, M., Rohani, A., Rahmati-Joneidabad, M. (2018). Solar thermal simulation and applications in greenhouse. *Information Processing in Agriculture*, 5 (1), 83–113. doi: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.10.003>
3. Mesmoudi, K., Soudani, A., Zitouni, B., Bournet, P. E., Serir, L. (2010). Experimental study of the energy balance of unheated greenhouse under hot and arid climates: Study for the night period of winter season. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 9 (1), 27–37. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2010.12.007>
4. Zhou, L., Li, X., Ni, G. W., Zhu, S., Zhu, J. (2019). The revival of thermal utilization from the Sun: interfacial solar vapor generation. *National Science Review*, 6 (3), 562–578. doi: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwz030>
5. Pavlov, G. K., Olesen, B. W. (2012) Thermal energy storage – A review of concepts and systems for heating and cooling applications in buildings: Part 1 – Seasonal storage in the ground, *HVAC&R Research*, 18 (3), 515–538. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10789669.2012.667039>
6. Almdros-Ibáñez, J. A., Fernández-Torrijos, M., Díaz-Heras, M., Belmonte, J. F., Sobrino, C. (2019). A review of solar thermal energy storage in beds of particles: Packed and fluidized beds. *Solar Energy*, 192, 193–237. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.047>
7. Liu, Y., Liu, Y., Tao, S., Liu, X., Wen, Z. (2014). Three-dimensional analysis of gas flow and heat transfer in a regenerator with alumina balls. *Applied Thermal Engineering*, 69 (1-2), 113–122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.058>

8. Adeyanju, A., Manohar, K. (2009). Theoretical and Experimental Investigation of Heat Transfer in Packed Beds. *Research Journal of Applied Sciences*, 4 (5), 166–177. Available at: <https://medwelljournals.com/abstract/?doi=rjasci.2009.166.177>
9. Bu, S. S., Yang, J., Zhou, M., Li, S. Y., Wang, Q. W., Guo, Z. X. (2014). On contact point modifications for forced convective heat transfer analysis in a structured packed bed of spheres. *Nuclear Engineering and Design*, 270, 21–33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.01.001>
10. Teitel, M., Barak, M., Antler, A. (2009). Effect of cyclic heating and a thermal screen on the nocturnal heat loss and microclimate of a greenhouse. *Biosystems Engineering*, 102 (2), 162–170. doi: [10 https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.11.013](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.11.013)
11. Albrecht, K. J., Ho, C. K. (2017). Heat Transfer Models of Moving Packed-Bed Particle-to-SCO<sub>2</sub> Heat Exchangers. ASME 2017 11th International Conference on Energy Sustainability. doi: <https://doi.org/10.1115/es2017-3377>
12. Messai, S., El, G., Sghaier, J., Belghith, A. (2014). Experimental study of the convective heat transfer coefficient in a packed bed at low Reynolds numbers. *Thermal Science*, 18 (2), 443–450. doi: <https://doi.org/10.2298/tsci120715108m>
13. Solodka, A., Volgusheva, N., Boshkova, I., Titlov, A., Rozhentsev, A. (2017). Investigation of heat exchange in a blown dense layer of granular materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (8 (89)), 58–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112217>
14. Kim, H.-K., Kang, G.-C., Moon, J.-P., Lee, T.-S., Oh, S.-S. (2018). Estimation of Thermal Performance and Heat Loss in Plastic Greenhouses with and without Thermal Curtains. *Energies*, 11 (3), 578. doi: <https://doi.org/10.3390/en11030578>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210752

**UNIFORM LARGE-SIZED LUMBER DRYING SYSTEM USING MW RADIATION AND BASING ON A SINGLE-WIRE E<sub>00</sub> WAVE ENERGY TRANSMISSION LINE (p. 21–28)**

**Ekaterina Ritter**

M. Kozybayev North-Kazakhstan University,  
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1201-1247>

**Vladimir Kismereshkin**

Omsk State Technical University, Omsk,  
Russian Federation  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7602-4218>

**Jacek Cieslik**

AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0203-5149>

**Alexey Savostin**

M. Kozybayev North-Kazakhstan University,  
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5057-2942>

**Dmitry Ritter**

M. Kozybayev North-Kazakhstan University,  
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8574-5834>

**Aizhan Aytulina**

M. Kozybayev North-Kazakhstan University,  
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9134-3783>

**Ildar Kasimov**

M. Kozybayev North-Kazakhstan University,  
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0207-9803>

**Bibigul Bekkozhiba**

M. Kozybayev North-Kazakhstan University,  
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8945-8477>

In order to generalize the possibilities of using MW radiation in industrial processes, the given paper considers and analyzes various methods of wood drying. Technological and economic advantages of wood drying in an ultra-high frequency electromagnetic field are well justified. Wood drying in the ultra-high frequency range is considered as the most optimal in contrast to traditional methods. This method is based on the penetration of electromagnetic energy into the material and converting it into heat.

The paper reveals the possibility of more effective use of MW radiation. It proposes a method for drying wood and large-sized lumber basing on a single-wire transmission line of electromagnetic energy of the surface wave. The paper also describes the advantages of the proposed method: the use of a single wire covered with a thin layer of dielectric material, the use of a vibratory system for surface wave excitation, and the use of a flat reflector. Special attention is paid to the contact area of the wire with a flat reflector since the perfection of this contact largely determines the efficiency of surface wave excitation. The conducted research estimated the influence of the parameters of the vibratory surface wave excitation system in a single waveguide on the efficiency of its excitation. The proposed vibratory excitation device allows quite a simple step-by-step adjustment of the thermal power in the irradiated object.

The design of the dissipation load for surface wave lines has been successfully tested during the laboratory works where certain ways of unclaimed electromagnetic energy utilization were suggested.

Following the results of the conducted research, we proposed a physical model of a system for microwave drying of wood and large-sized lumber.

**Keywords:** microwave lumber drying, single-wire transmission line, surface wave excitation, dissipation load.

**References**

1. Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R. L. (2017). *Handbook of Induction Heating*. CRC Press, 772. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315117485>
2. Cserta, E., Hegedűs, G., Németh, R. (2012). Evolution of temperature and moisture profiles of wood exposed to infrared radiation. *BioResources*, 7 (4). doi: <https://doi.org/10.15376/biores.7.4.5304-5311>
3. Torgovnikov, G., Vinden, P. (2010). Microwave Wood Modification Technology and Its Applications. *Forest Products Journal*, 60 (2), 173–182. doi: <https://doi.org/10.13073/0015-7473-60.2.173>
4. Pantea, M., Laza Bulc, M., Grava, A., Silaghi, A. (2012). The Influence of microwaves on wood drying and moisture migration inside. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5 (2), 93–96.
5. Kadem, S., Younsi, R., Lachemet, A. (2016). Computational analysis of heat and mass transfer during microwave drying of timber. *Thermal Science*, 20 (5), 1447–1455. doi: <https://doi.org/10.2298/tsci140109055k>
6. Ananias, R. A., Ulloa, J., Elustondo, D. M., Salinas, C., Rebollo, P., Fuentes, C. (2012). Energy Consumption in Industrial



- Drying of Radiata Pine. *Drying Technology*, 30 (7), 774–779. doi: <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.663029>
7. Li, Z. Y., Wang, R. F., Kudra, T. (2011). Uniformity Issue in Microwave Drying. *Drying Technology*, 29 (6), 652–660. doi: <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.521963>
  8. Aichholzer, A., Schubert, C., Mayer, H., Arthaber, H. (2017). Microwave testing of moist and oven-dry wood to evaluate grain angle, density, moisture content and the dielectric constant of spruce from 8 GHz to 12 GHz. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76 (1), 89–103. doi: <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1203-x>
  9. Ivanov, I., Tikhonov, V., Pronina, O., (2015). Microwave installation for disinsection of wood. *Electronic scientific & practical journal «Modern technics and technologies»*, 8 (48). Available at: <http://technology.snauka.ru/2015/08/7713>
  10. Koiš, V., Dömény, J., Tippner, J. (2014). Microwave Device for Continuous Modification of Wood. *BioResources*, 9 (2). doi: <https://doi.org/10.15376/biores.9.2.3025-3037>
  11. Goreshev, M. A., Kazarin, A. N., Lopatin, V. V., Sekisov, F. G., Smerdov, O. V. (2013). Combined Timber Drying Method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (2), 336–339. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0838-7>
  12. Torres, S. sandoval, Jomaa, W., Puiggali, J.-R., Avramidis, S. (2011). Multiphysics modeling of vacuum drying of wood. *Applied Mathematical Modelling*, 35 (10), 5006–5016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.04.011>
  13. He, Z., Qian, J., Qu, L., Wang, Z., Yi, S. (2019). Simulation of moisture transfer during wood vacuum drying. *Results in Physics*, 12, 1299–1303. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.01.017>
  14. Harris, G., Brodie, G., Ozarska, B., Taube, A. (2011). Design of a Microwave Chamber for the Purpose of Drying of Wood Components for Furniture. *Transactions of the ASABE*, 54 (1), 363–368. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.36246>
  15. Goubau, G. (1950). Surface Waves and Their Application to Transmission Lines. *Journal of Applied Physics*, 21 (11), 1119–1128. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1699553>
  16. Bhatnagar, P. S. (1976). Surface Wave Transmission Lines. *IETE Journal of Education*, 17 (1), 24–31. doi: <https://doi.org/10.1080/09747338.1976.11450133>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210263

**DEPENDENCE OF THE INTERNAL WAVE ENERGY FLUX ON THE PARAMETERS OF A TWOLAYER HYDRODYNAMIC SYSTEM (p. 28–36)**

**Yurii Hurtovyi**

Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State Pedagogical University, Kropyvnytskyi, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1499-7089>

**Olga Avramenko**

Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State Pedagogical University, Kropyvnytskyi, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-7960-1436>

**Volodymyr Naradovyi**

Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State Pedagogical University, Kropyvnytskyi, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5187-8831>

The study was performed to analyze the flux of energy of internal gravitational-capillary waves in a two-layer hydrodynamic liquid system with finite layer thicknesses. The problem was considered for an ideal incompressible fluid in the field of gravity as well

as taking into account the forces of surface tension. The problem was formulated in a dimensionless form for small values of the coefficient of nonlinearity. The dispersion of the gravitational-capillary progressive waves was studied in detail depending on the coefficient of surface tension and the ratio of layer densities. It was proved that with the increase in the wavenumber, the group velocity begins to pass ahead of the phase velocity and their equality occurs at the minimum of the phase velocity. Dependence of the total average energy flux on the wavenumber (wavelength) and thickness of the liquid layers was calculated and graphically analyzed for different values of physical quantities, in particular, density and the coefficient of surface tension. It follows from the analysis that the energy flux of gravitational internal waves increases to a certain maximum value with an increase in the thickness of the lower layer and then approaches a certain limit value. For capillary waves, the energy flux of internal waves is almost independent of the thickness of the lower layer. It was also shown that the average energy flux for gravitational waves at a stable amplitude is almost independent of the wavelength. On the contrary, for capillary waves, the energy flux increases sharply with an increase in the wavenumber.

The results of the analysis of the energy flux of internal progressive waves make it possible to qualitatively assess physical characteristics in the development of environmental technologies that use internal undulatory motions in various aquatic environments as a source of energy.

**Keywords:** energy flux, internal progressive waves, two-layer hydrodynamic system, anomalous dispersion.

**Reference**

1. Carr, M., Sutherland, P., Haase, A., Evers, K., Fer, I., Jensen, A. et al. (2019). Laboratory Experiments on Internal Solitary Waves in Ice-Covered Waters. *Geophysical Research Letters*, 46 (21), 12230–12238. doi: <https://doi.org/10.1029/2019gl084710>
2. Pava, J. A., Saut, J.-C. (2019). Existence of solitary wave solutions for internal waves in two-layer systems. *Quarterly of Applied Mathematics*, 78 (1), 75–105. doi: <https://doi.org/10.1090/qam/1546>
3. Stepanyants, Y. A. (2020). Nonlinear Waves in a Rotating Ocean (The Ostrovsky Equation and Its Generalizations and Applications). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 56 (1), 16–32. doi: <https://doi.org/10.1134/s0001433820010077>
4. Stepanyants, Y. (2019). The effects of interplay between the rotation and shoaling for a solitary wave on variable topography. *Studies in Applied Mathematics*, 142 (4), 465–486. doi: <https://doi.org/10.1111/sapm.12255>
5. Du, H., Wei, G., Wang, S.-D., Wang, X.-L. (2019). Experimental study of elevation- and depression-type internal solitary waves generated by gravity collapse. *Physics of Fluids*, 31 (10). doi: <https://doi.org/10.1063/1.5121556>
6. Zou, L., Hu, Y., Wang, Z., Pei, Y., Yu, Z. (2019). Computational analyses of fully nonlinear interaction of an internal solitary wave and a free surface wave. *AIP Advances*, 9 (3), 035234. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5088428>
7. Mohapatra, S. C., Gadelho, J. F. M., Soares, C. G. (2019). Effect of Interfacial Tension on Internal Waves Based on Boussinesq Equations in Two-Layer Fluids. *Journal of Coastal Research*, 35 (2), 445. doi: <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-17-00186.1>
8. Wang, C., Wang, X., Da Silva, J. C. B. (2019). Studies of Internal Waves in the Strait of Georgia Based on Remote Sensing Images. *Remote Sensing*, 11 (1), 96. doi: <https://doi.org/10.3390/rs11010096>
9. Shimizu, K. (2019). Fully nonlinear simple internal waves over subcritical slopes in continuously stratified fluids: Theoretical

- development. *Physics of Fluids*, 31 (1), 016601. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5074095>
10. Chan, H. N., Grimshaw, R. H. J., Chow, K. W. (2018). Modeling internal rogue waves in a long wave-short wave resonance framework. *Physical Review Fluids*, 3 (12). doi: <https://doi.org/10.1103/physrevfluids.3.124801>
  11. Hooi, M. H., Tiong, W. K., Tay, K. G., Chiew, K. L., Sze, S. N. (2018). Numerical Simulation of Shoaling Internal Solitary Waves in Two-layer Fluid Flow. *MATEMATIKA*, 34 (2), 333–350. doi: <https://doi.org/10.11113/matematika.v34.n2.1000>
  12. Taklo, T. M. A., Choi, W. (2020). Group resonant interactions between surface and internal gravity waves in a two-layer system. *Journal of Fluid Mechanics*, 892. doi: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.180>
  13. Kaminski, A. K., Helfrich, K. R., Pedlosky, J. (2020). An experimental investigation of the Rossby two-slit problem. *Journal of Fluid Mechanics*, 893. doi: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.224>
  14. Perfect, B., Kumar, N., Riley, J. J. (2020). Energetics of Seamount Wakes. Part II: Wave Fluxes. *Journal of Physical Oceanography*, 50 (5), 1383–1398. doi: <https://doi.org/10.1175/jpo-d-19-0104.1>
  15. Rowe, K. L., Diamessis, P. J., Zhou, Q. (2020). Internal gravity wave radiation from a stratified turbulent wake. *Journal of Fluid Mechanics*, 888. doi: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.40>
  16. Selvan, S. A., Behera, H. (2020). Wave energy dissipation by a floating circular flexible porous membrane in single and two-layer fluids. *Ocean Engineering*, 206, 107374. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107374>
  17. Avramenko, O. V., Naradovyi, V. V., Selezov, I. T. (2018). Energy of Motion of Internal and Surface Waves in a Two-Layer Hydrodynamic System. *Journal of Mathematical Sciences*, 229 (3), 241–252. doi: <https://doi.org/10.1007/s10958-018-3674-7>
  18. Meringolo, D. D., Liu, Y., Wang, X.-Y., Colagrossi, A. (2018). Energy balance during generation, propagation and absorption of gravity waves through the  $\delta$ -LES-SPH model. *Coastal Engineering*, 140, 355–370. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.07.007>
  19. Naradovyi, V., Kharchenko, D. (2019). Investigation of the energy of wave motions in a three-layer hydrodynamic system. *Waves in Random and Complex Media*, 1–20. doi: <https://doi.org/10.1080/17455030.2019.1699674>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.208333

**ANGULAR MOMENTUM TEARING MECHANISM INVESTIGATION THROUGH INTERMOLECULAR AT THE BUBBLE INTERFACE (p. 37–47)**

**Tri Tjahjono**

Brawijaya University, Malang, Indonesia  
Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0540-4234>

**I. N. Gede Wardana**

Brawijaya University, Malang, Indonesia  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3146-9517>

**Mega Nur Sasongko**

Brawijaya University, Malang, Indonesia  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0275-6947>

**Agung Sugeng Widodo**

Brawijaya University, Malang, Indonesia  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5331-9950>

Two-phase flow with gas-liquid component is commonly applied in industries, specifically in the refinery process of liquid products. Oil products with bubbles contents are undesirable in a production process. This paper describes an investigation of a process mechanism regarding the bubble breakup of the two-phase injection into quiescent water. The analytical model was developed based on the force mechanism of water flow at the bubble interface. The inertia force of water flow continually pushes the bubble while the drag force resists it. The bubble gets shapes change that affects the hydrodynamic flow around the bubble. Vortices with high energy density impact and make the stress interface over its strength so that the interface gets tear. The experiment was carried out by observing in the middle part of the injected flow. It was found that the forming process of bubble breakup can be explained as the following steps:

1) sweep model is a bubble pushed by the inertial force of water flow. The viscous force of water shears the surface of the bubble. The effect of both forces, the bubble changes its shape. Then trailing vortex starts to appear in near bubble tail. The second flow of water is in around of the bubble to strengthen the vortex energy density that causes fragments to detach from the parent bubble;

2) stretching model, the apparent bubble has high momentum force infiltrated in stagnant water depth and bubble ends are stretched out by the inertial force of the bubble and viscous force of water. The bubble surface has experienced stretching and tearing become splitting away. Based on the finding, the breakup process is highly dependent on the momentum of water flow, which triggers the secondary flow as the initial process of vortex flow, and it causes the tear of the bubble surface due to angular momentum.

**Keywords:** inertial and viscous force, angular momentum, quiescent water, energy density, bubble interface.

**References**

1. Walter, J. F., Blanch, H. W. (1986). Bubble break-up in gas – liquid bioreactors: Break-up in turbulent flows. *The Chemical Engineering Journal*, 32 (1), B7–B17. doi: [https://doi.org/10.1016/0300-9467\(86\)85011-0](https://doi.org/10.1016/0300-9467(86)85011-0)
2. Hinze, J. O. (1955). Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. *AIChE Journal*, 1 (3), 289–295. doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690010303>
3. Chen, Z., Ata, S., Jameson, G. J. (2015). Break-up of bubble clusters in turbulent flow – Theory. *Powder Technology*, 279, 228–232. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.016>
4. Tomiyama, A., Kataoka, I., Zun, I., Sakaguchi, T. (1998). Drag Coefficients of Single Bubbles under Normal and Micro Gravity Conditions. *JSME International Journal Series B*, 41 (2), 472–479. doi: <https://doi.org/10.1299/jsmeb.41.472>
5. Rassame, S., Hibiki, T., Ishii, M. (2016). Void penetration length from air injection through a downward large diameter submerged pipe in water pool. *Annals of Nuclear Energy*, 94, 832–840. doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.04.046>
6. Bai, H., Thomas, B. G. (2001). Bubble formation during horizontal gas injection into downward-flowing liquid. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 32 (6), 1143–1159. doi: <https://doi.org/10.1007/s11663-001-0102-y>
7. Xing, C., Wang, T., Guo, K., Wang, J. (2014). A unified theoretical model for breakup of bubbles and droplets in turbulent flows. *AIChE Journal*, 61 (4), 1391–1403. doi: <https://doi.org/10.1002/aic.14709>
8. Bari, S. D., Robinson, A. J. (2013). Experimental study of gas injected bubble growth from submerged orifices. *Experimen-*

- tal Thermal and Fluid Science, 44, 124–137. doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.06.005>
9. Han, L., Luo, H., Liu, Y. (2011). A theoretical model for droplet breakup in turbulent dispersions. *Chemical Engineering Science*, 66 (4), 766–776. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.11.041>
  10. Wichterle, K., Wichterlová, J., Kulhánková, L. (2005). Breakup of Bubbles Rising in Liquids of Low and Moderate Viscosity. *Chemical Engineering Communications*, 192 (5), 550–556. doi: <https://doi.org/10.1080/00986440590495034>
  11. Lima Neto, I. E., Zhu, D. Z., Rajaratnam, N. (2008). Bubbly jets in stagnant water. *International Journal of Multiphase Flow*, 34 (12), 1130–1141. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.06.005>
  12. Zhang, C., Sa, R., Zhou, D., Jiang, H. (2017). Effects of gas velocity and break size on steam penetration depth using gas jet into water similarity experiments. *Progress in Nuclear Energy*, 98, 38–44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.02.006>
  13. Canedo, E. L., Favelukis, M., Tadmor, Z., Talmon, Y. (1993). An experimental study of bubble deformation in viscous liquids in simple shear flow. *AIChE Journal*, 39 (4), 553–559. doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690390403>
  14. Al-Hayes, R. A. M., Winterton, R. H. S. (1981). Bubble diameter on detachment in flowing liquids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 24 (2), 223–230. doi: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(81\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(81)90030-2)
  15. Yang, B., Prosperetti, A., Takagi, S. (2003). The transient rise of a bubble subject to shape or volume changes. *Physics of Fluids*, 15 (9), 2640–2648. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1592800>
  16. Liu, L., Yan, H., Zhao, G. (2015). Experimental studies on the shape and motion of air bubbles in viscous liquids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 62, 109–121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.11.018>
  17. Lee, H. S., Merte, H. (1996). Spherical vapor bubble growth in uniformly superheated liquids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39 (12), 2427–2447. doi: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00342-8](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00342-8)
  18. Nguyen, V. T., Song, C.-H., Bae, B.-U., Euh, D.-J. (2013). Modeling of bubble coalescence and break-up considering turbulent suppression phenomena in bubbly two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 54, 31–42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.03.001>
  19. Shi, W., Yang, X., Sommerfeld, M., Yang, J., Cai, X., Li, G., Zong, Y. (2019). Modelling of mass transfer for gas-liquid two-phase flow in bubble column reactor with a bubble breakage model considering bubble-induced turbulence. *Chemical Engineering Journal*, 371, 470–485. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.047>
  20. Chen, Y., Ding, J., Weng, P., Lu, Z., Li, X. (2019). A theoretical model describing bubble deformability and its effect on binary breakup in turbulent dispersions. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 75, 352–360. doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2018.09.004>
  21. Zhang, H., Yang, G., Sayyar, A., Wang, T. (2020). An improved bubble breakup model in turbulent flow. *Chemical Engineering Journal*, 386, 121484. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.064>
  22. Hreiz, R., Lainé, R., Wu, J., Lemaitre, C., Gentric, C., Fünfschilling, D. (2014). On the effect of the nozzle design on the performances of gas-liquid cylindrical cyclone separators. *International Journal of Multiphase Flow*, 58, 15–26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.08.006>
  23. Sosinovich, V. A., Tsyganov, V. A., Kolovandin, B. A., Puris, B. I., Gertsovich, V. A. (1995). Model of gas bubble breakup in a turbulent liquid flow. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 68 (2), 164–175. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00862856>
  24. Emami, A., Briens, C. (2008). Study of downward gas jets into a liquid. *AIChE Journal*, 54 (9), 2269–2280. doi: <https://doi.org/10.1002/aic.11524>
  25. Clanet, C., Lasheras, J. C. (1997). Depth of penetration of bubbles entrained by a plunging water jet. *Physics of Fluids*, 9 (7), 1864–1866. doi: <https://doi.org/10.1063/1.869336>
  26. Liu, Z., Reitz, R. D. (1997). An analysis of the distortion and breakup mechanisms of high speed liquid drops. *International Journal of Multiphase Flow*, 23 (4), 631–650. doi: [https://doi.org/10.1016/s0301-9322\(96\)00086-9](https://doi.org/10.1016/s0301-9322(96)00086-9)
  27. Das, S., Weerasiri, L. D., Yang, W. (2017). Influence of surface tension on bubble nucleation, formation and onset of sliding. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 516, 23–31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.12.010>
  28. Jo, D., Revankar, S. T. (2011). Investigation of bubble breakup and coalescence in a packed-bed reactor – Part 2: Development of a new bubble breakup and coalescence model. *International Journal of Multiphase Flow*, 37 (9), 1003–1012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.06.015>
  29. Wang, X., Zhu, C., Wu, Y., Fu, T., Ma, Y. (2015). Dynamics of bubble breakup with partly obstruction in a microfluidic T-junction. *Chemical Engineering Science*, 132, 128–138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.04.038>
  30. Mortuza, S. M., Gent, S. P., Kommareddy, A., Anderson, G. A. (2012). Investigation of Bubble and Fluid Flow Patterns Within a Column Photobioreactor. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 9 (3). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4006052>
  31. Kajero, O. T., Abdulkadir, M., Abdulkareem, L., Azzopardi, B. J. (2018). Experimental study of viscous effects on flow pattern and bubble behavior in small diameter bubble column. *Physics of Fluids*, 30 (9), 093101. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5045160>
  32. Tomita, Y., Robinson, P. B., Tong, R. P., Blake, J. R. (2002). Growth and collapse of cavitation bubbles near a curved rigid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 466, 259–283. doi: <https://doi.org/10.1017/s0022112002001209>
  33. Han, R., Wang, S., Yao, X. (2016). Dynamics of an air bubble induced by an adjacent oscillating bubble. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 62, 65–77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2015.09.009>
  34. Ellingsen, K., Risso, F. (2001). On the rise of an ellipsoidal bubble in water: oscillatory paths and liquid-induced velocity. *Journal of Fluid Mechanics*, 440, 235–268. doi: <https://doi.org/10.1017/s0022112001004761>
  35. Chu, P., Waters, K. E., Finch, J. A. (2016). Break-up in formation of small bubbles: Break-up in a confined volume. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 503, 88–93. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.05.037>
  36. Rodríguez-Rodríguez, J., Gordillo, J. M., Martínez-Bazán, C. (2006). Breakup time and morphology of drops and bubbles in a high-Reynolds-number flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 548, 69–86. doi: <https://doi.org/10.1017/s0022112005000741x>
  37. Ratajczak, H., Orville-Thomas, W. J. (1973). Charge-transfer properties of hydrogen bonds. III. Charge-transfer theory and the relation between the energy and the enhancement of dipole moment of hydrogen-bonded complexes. *The Journal of Chemical Physics*, 58 (3), 911–919. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1679344>
  38. Zivkov, E., Yarusevych, S., Porfiri, M., Peterson, S. D. (2015). Numerical investigation of the interaction of a vortex dipole with a



- deformable plate. *Journal of Fluids and Structures*, 58, 203–215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.08.009>
39. Egger, D. A., Zojer, E. (2013). Anticorrelation between the Evolution of Molecular Dipole Moments and Induced Work Function Modifications. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 4 (20), 3521–3526. doi: <https://doi.org/10.1021/jz401721r>
40. Joshi, S., Kumari, S., Bhattacharjee, R., Sarmah, A., Sakhuja, R., Pant, D. D. (2015). Experimental and theoretical study: Determination of dipole moment of synthesized coumarin–triazole derivatives and application as turn off fluorescence sensor: High sensitivity for iron(III) ions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 220, 1266–1278. doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.07.053>
41. Starikov, V. I., Petrova, T. M., Solodov, A. M., Solodov, A. A., Deichuli, V. M. (2019). Study of the H<sub>2</sub>O dipole moment and polarisability vibrational dependence by the analysis of rovibrational line shifts. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 210, 275–280. doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.11.032>
42. Ngafwan, N., Wardana, I. N. G., Wijayanti, W., Siswanto, E. (2018). The role of NaOH and papaya latex bio-activator during production of carbon nanoparticle from rice husks. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 9 (4), 045011. doi: <https://doi.org/10.1088/2043-6254/aaf3af>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209762

**ON USING THE ANSYS FLUENT SOFTWARE FOR CALCULATING THE PROCESS OF BURNING A MIXTURE OF PARTICLES FROM DIFFERENT TYPES OF SOLID FUELS (p. 48–53)**

**Mark Nekhamin**

Coal Energy Technology Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3679-321X>

**Ihor Beztseynyi**

Coal Energy Technology Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6536-5121>

**Natalia Dunayevska**

Coal Energy Technology Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3271-8204>

**Volodimir Vyfatnuik**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0771-2652>

The use of binary mixtures in TPP steam generators as fuels is caused by various reasons, such as improvement of ignition conditions and the possible environmental benefits of burning binary mixtures. Since the existing boilers of TPP were calculated for burning a single type of solid fuel, the relevance of numerical modeling of the combustion processes of binary mixtures is obvious. Among the software widely used to estimate the operation of energy devices is the ANSYS FLUENT program, whose specification does not include the procedure for using it in order to simulate the combustion of solid-fuel mixtures.

To apply the software for this purpose, in the first approach, the mixture of solid fuels is replaced by one fuel with averaged characteristics. Such a model is approximate because it is impos-

sible to reproduce the interaction among the components of the mixture. The second approach makes use of the ANSYS FLUENT software's feature to take into consideration additional (liquid or gas) fuel to replace it by the second solid fuel.

The application of these approaches to the description of the combustion process of anthracite and gas coal mixtures in different ratios and with different particle sizes has shown the proximity of parameters in the furnace. At the same time, the use of a second approach demonstrated the effect exerted by a bituminous coal additive on the fields of anthracite burning intensity, consistent with the known fact of intensification of the combustion process of a less active component of the mixture with the addition of a more active one.

To test the simulation in line with a second approach, the processes in the furnace of the TPP-210A boiler were calculated in three-dimensional approximation when replacing the lean coal with a mixture of bituminous coal and anthracite. The proximity of the resulting parameters is consistent with the known test data and confirms the sufficient correctness of the simulation of the combustion of the mixture of coals.

**Keywords:** Ansys Fluent, CFD modeling, solid fuel, combustion, blend, bituminous coal, lean coal, anthracite.

**References**

- Ghenai, C., Janajreh, I. (2010). CFD analysis of the effects of co-firing biomass with coal. *Energy Conversion and Management*, 51 (8), 1694–1701. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.045>
- Bhuiyan, A. A., Naser, J. (2015). CFD modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel combustion in a large scale power plant. *Fuel*, 159, 150–168. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.058>
- Bhuiyan, A. A., Naser, J. (2015). Computational modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel condition in a small scale furnace. *Fuel*, 143, 455–466. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.089>
- Tabet, E., Gökalp, I. (2015). Review on CFD based models for co-firing coal and biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1101–1114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.045>
- Gungor, A. (2013). Simulation of co-firing coal and biomass in circulating fluidized beds. *Energy Conversion and Management*, 65, 574–579. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.023>
- Rokhman, B. B., Matviichuk, A. S. (2012). Modeling and Numerical Study of the Thermochemical Processing of Biomass and Coal in the Furnace Devices. 1. The Fixed Bed. *Energotehnologii i resursoberezhennie*, 2, 4–10.
- Li, J., Brzdekiewicz, A., Yang, W., Blasiak, W. (2012). Co-firing based on biomass torrefaction in a pulverized coal boiler with aim of 100% fuel switching. *Applied Energy*, 99, 344–354. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.046>
- Backreedy, R. I., Fletcher, L. M., Jones, J. M., Ma, L., Pourkashanian, M., Williams, A. (2005). Co-firing pulverised coal and biomass: a modeling approach. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30 (2), 2955–2964. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.085>
- Zhang, X., Ghamari, M., Ratner, A. (2013). Numerical modeling of co-firing a light density biomass, oat (*Avena sativa*) hulls, and chunk coal in fluidized bed boiler. *Biomass and Bioenergy*, 56, 239–246. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.05.006>
- Yan, B.-H., Cao, C.-X., Cheng, Y., Jin, Y., Cheng, Y. (2014). Experimental investigation on coal devolatilization at high

temperatures with different heating rates. *Fuel*, 117, 1215–1222. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.016>

11. ANSYS FLUENT Theory Guide (2012).
12. Hzmalyan, D. M., Kogan, Ya. A.; Hzmalyan, D. M. (Ed.) (1976). *Teoriya goreniya i topochnye ustroystva*. Moscow: Energiya, 487.
13. Beztseynyi, I. V., Bondzyk, D. L., Shchudlo, T. S., Pliusnova, L. P., Dunaievskaya, N. I. (2011). *Doslidzhennia vyhoriannia sumishei antratsytu i hazovoho vuhillia*. Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy “Kyivskiy politekhnichnyi instytut”, 5, 27–30.
14. Chernyavskiy, M. V., Provalov, O. Yu., Beztseyniy, I. V., Moyiseenko, O. V. (2016). Development of Methods and Practical Experience in the Preparation and Pulverized Combustion of Anthracite and Bituminous Coal Mixture at Zmiev TPP. *Energetologiya i resursoberezhennie*, 4, 3–13.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.208440

#### A THEORETICAL STUDY OF STABILITY OF SOLID FUEL BURNING WITH A TWOPHASE GASIFICATION AREA (p. 54–65)

**Viktor Volkov**

Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3990-8126>

**Natalia Makoyed**

Odessa National Academy of Food Technologies,  
Odessa, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4591-555X>

**Yuliia Loboda**

Odessa National Academy of Food Technologies,  
Odessa, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7083-552X>

**Oksana Sokolova**

Odessa National Academy of Food Technologies,  
Odessa, Ukraine  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8227-6814>

Theoretically, the combustion stability of solid fuel, which during the combustion process is decomposed according to the “solid phase – liquid phase – gas” scheme, is investigated. The physical and mathematical models for the propagation of small perturbations of combustion are constructed. The medium in all areas of combustion and in combustion products is assumed to be incompressible, and the viscosity of the fuel in the liquid phase is taken into account. Thus, perturbations of hydrodynamic parameters are considered not only in the two-phase gasification zone, but also in the combustion products area and the geometric perturbation of the instantaneous combustion front (flame), distorting the shape of its surface, is also specified. That is the characteristic feature of the presented physical model. The mathematical eigenvalue problem is set and solved. This problem is reduced to an algebraic characteristic equation for a dimensionless complex eigenvalue, which positivity determines the instability. It is proved that in the limiting case of the absence of a liquid phase, absolute instability takes place. At the other limiting case – for perturbations with infinite wavelength – a transition to stability takes place. The latter fact indicates that the presence of a viscous liquid film and changes in the length of the gasification zone under the influence of perturbations have a significant stabilizing effect on solid fuel combustion. In the general case, a sufficient condition for the instability of the roots of the characteristic equation is analytically determined. The

physical interpretation of the mathematical results explains the processes of autoturbulization of solid fuel combustion and the possible transition of combustion to deflagration explosion or detonation. The results of the study are in qualitative agreement with experimental data and can additionally be used for theoretical analysis of the stability of the liquid fuel combustion process in the combustion chamber.

**Keywords:** solid fuel combustion, fuel gasification, combustion instability, deflagration explosion, detonation.

#### References

1. Clavin, P., Searby, G. (2016). *Combustion Waves and Fronts in Flows: Flames, Shocks, Detonations, Ablation Fronts and Explosion of Stars*. Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9781316162453>
2. Liberman, M. (2008). *Introduction to Physics and Chemistry of Combustion*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-78759-4>
3. Swinney, H. L., Gollub, J. P. (Eds.) (2014). *Hydrodynamic Instabilities and the Transition to Turbulence*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/3-540-13319-4>
4. Bradley, D., Cresswell, T. M., Puttock, J. S. (2001). Flame acceleration due to flame-induced instabilities in large-scale explosions. *Combustion and Flame*, 124 (4), 551–559. doi: [https://doi.org/10.1016/s0010-2180\(00\)00208-x](https://doi.org/10.1016/s0010-2180(00)00208-x)
5. Ciccarelli, G., Dorofeev, S. (2008). Flame acceleration and transition to detonation in ducts. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 (4), 499–550. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.11.002>
6. Khokhlov, A., Oran, E., Thomas, G. (1999). Numerical simulation of deflagration-to-detonation transition: the role of shock–flame interactions in turbulent flames. *Combustion and Flame*, 117 (1-2), 323–339. doi: [https://doi.org/10.1016/s0010-2180\(98\)00076-5](https://doi.org/10.1016/s0010-2180(98)00076-5)
7. Oran, E. S., Gamezo, V. N. (2007). Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion. *Combustion and Flame*, 148 (1-2), 4–47. doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2006.07.010>
8. Koksharov, A., Bykov, V., Kagan, L., Sivashinsky, G. (2018). Deflagration-to-detonation transition in an unconfined space. *Combustion and Flame*, 195, 163–169. doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.03.006>
9. Volkov, V. E. (2014). Deflagration-to-detonation transition and the detonation induction distance estimation. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 1, 120–126. doi: <https://doi.org/10.15276/opu.1.43.2014.21>
10. Pekalski, A. A., Zevenbergen, J. F., Lemkowitz, S. M., Pasman, H. J. (2005). A Review of Explosion Prevention and Protection Systems Suitable as Ultimate Layer of Protection in Chemical Process Installations. *Process Safety and Environmental Protection*, 83 (1), 1–17. doi: <https://doi.org/10.1205/psep.04023>
11. Nolan, D. P. (2011). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles: for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities*. William Andrew, 340. doi: <https://doi.org/10.1016/c2009-0-64221-5>
12. Nettleton, M. A. (1987). *Gaseous detonations: Their nature, effects and control*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3149-7>
13. Buckmaster, J. (1993). The Structure and Stability of Laminar Flames. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25 (1), 21–53. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.25.010193.000321>
14. Peters, N. (2000). *Turbulent Combustion*. Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511612701>



15. Veynante, D., Vervisch, L. (2002). Turbulent combustion modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 28 (3), 193–266. doi: [https://doi.org/10.1016/s0360-1285\(01\)00017-x](https://doi.org/10.1016/s0360-1285(01)00017-x)
16. Giusti, A., Mastorakos, E. (2019). Turbulent Combustion Modelling and Experiments: Recent Trends and Developments. *Flow, Turbulence and Combustion*, 103 (4), 847–869. doi: <https://doi.org/10.1007/s10494-019-00072-6>
17. Greatrix, D. (2012). *Powered Flight: The Engineering of Aerospace Propulsion*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2485-6>
18. Crocco, L., Cheng, S.-I. (1956). *Theory of Combustion Instability in Liquid Propellant Rocket Motors*. Butterworths Scientific Publications, 200.
19. Shchelkin, K. I., Troshin, Ya. K. (1964). *Gasdynamics of combustion*. National Aeronautics and Space Administration, 365.
20. Marshakov, V. N., Istratov, A. G., Puchkov, V. M. (2003). Combustion-front non-one-dimensionality in single- and double-base propellants. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 39, 452–457. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1024791006499>
21. Marshakov, V. N., Istratov, A. G. (2007). Critical diameter and transverse waves of powder combustion. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 43 (2), 188–193. doi: <https://doi.org/10.1007/s10573-007-0025-2>
22. Timnat, Y. M. (1987). *Advanced Chemical Rocket Propulsion*. Academic Press, 286.
23. Gusachenko, L. K., Zarko, V. E. (2005). Combustion models for energetic materials with completely gaseous reaction products. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 41 (1), 20–34. doi: <https://doi.org/10.1007/s10573-005-0003-5>
24. Sabdenov, K. O. (2016). Generation of hydrodynamic instability in the gasification region of propellant. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 52 (6), 683–693. doi: <https://doi.org/10.1134/s0010508216060083>
25. Vilyunov, V. N., Dvoryashin, A. A. (1973). An experimental investigation of the erosive burning effect. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 7 (1), 38–42. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00748911>
26. Gusachenko, L. K., Zarko, V. E. (2007). Erosive burning. Modeling problems. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 43 (3), 286–296. doi: <https://doi.org/10.1007/s10573-007-0042-1>
27. Sabdenov, K. O., Erzada, M. (2016). Negative erosion effect and the emergence of unstable combustion. 1. Analysis of the models. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 52 (1), 67–73. doi: <https://doi.org/10.1134/s0010508216010093>
28. Sabdenov, K. O., Erzada, M. (2016). Negative erosion effect and the emergence of unstable combustion. 2. numerical simulation. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 52 (2), 193–202. doi: <https://doi.org/10.1134/s001050821602009x>
29. On the theory of slow combustion (1965). *Collected Papers of L.D. Landau*, 396–403. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-010586-4.50059-6>
30. Aslanov, S. K., Volkov, V. E. (1991). Integral method for study of hydrodynamic stability of a laminar flame. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 27 (5), 553–558. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00784941>
31. Volkov, V. E. (2015). One-dimensional flame instability and control of burning in fire-chamber. *Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi*, 1, 85–91. doi: <https://doi.org/10.15276/opu.1.45.2015.14>
32. Kuo, K. K., Acharya, R. (2012). *Fundamentals of Turbulent and Multiphase Combustion*. John Wiley & Sons, Inc. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118107683>
33. Xiao, H. (2016). *Experimental and Numerical Study of Dynamics of Premixed Hydrogen-Air Flames Propagating in Ducts*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48379-4>
34. Yoon, S. H., Noh, T. J., Fujita, O. (2017). Effects of Lewis number on generation of primary acoustic instability in downward-propagating flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36 (1), 1603–1611. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.09.013>
35. Yoon, S. H., Hu, L., Fujita, O. (2018). Experimental observation of pulsating instability under acoustic field in downward-propagating flames at large Lewis number. *Combustion and Flame*, 188, 1–4. doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.09.026>
36. Dubey, A. K., Koyama, Y., Hashimoto, N., Fujita, O. (2019). Effect of geometrical parameters on thermo-acoustic instability of downward propagating flames in tubes. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37 (2), 1869–1877. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.155>
37. Volkov, V. E. (2014). Mathematical simulation of laminar-turbulent transition and the turbulence scale estimation. *Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi*, 2, 155–159. doi: <https://doi.org/10.15276/opu.2.44.2014.27>
38. Volkov, V. E. (2016). Two-dimensional flame instability and control of burning in the half-open firechamber. *Automation of Technological and Business Processes*, 8 (1), 21–27. doi: <https://doi.org/10.21691/atbp.v8i1.18>

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210767**

**DETERMINATION OF PARAMETERS OF THE CARBON-CONTAINING MATERIALS GASIFICATION PROCESS IN THE ROTARY KILN COOLER DRUM (p. 65–77)**

**Anton Karvatskii**

National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2421-4700>

**Taras Lazariev**

Yuzhnoye Design Office, Dnipro, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-7791-3575>

**Serhii Leleka**

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-4372-9454>

**Ihor Mikulionok**

National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-8268-7229>

**Olena Ivanenko**

National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6838-5400>

An assessment of the feasibility of using the existing equipment of a rotary kiln cooler drum for heat treatment of a carbon-containing filler to produce synthesis gas using production waste in the form of a dust fraction of heat-treated petroleum coke or anthracite is carried out. A mathematical model of the process of gasification of carbon particles is formulated in the continuous-discrete formulation, including

thirteen global reactions, of which four are heterogeneous and nine are homogeneous. A numerical model of gasification of a dust fraction of a carbon-containing filler in the rotary kiln cooler drum in the axisymmetric formulation is developed. The convergence of the numerical solution of the gasification problem by the grid step is investigated. It is found that the computational grid, which includes 73,620 cells and 75,202 nodes, leads to an error in determining the main parameters of the model of no more than 1–2 %. Verification of the developed numerical model is performed. It is found that the difference between the molar fractions of CO and H<sub>2</sub>, the values of which were obtained by various software products (Fluent, NASA CEA), is in the range of (2.8...5.8) %. Using the developed numerical model of the process of gasification of a carbon-containing filler in the rotary kiln cooler drum, the quantitative composition of the combustible components of the syngas for different initial parameters is determined. It is found that with the ratio O<sub>2</sub>/C=(42.7...51.6) %, the predicted quantitative composition of the combustible gases of synthesis gas in molar fractions is CO=(32.8...36.9) %, H<sub>2</sub>=(17.1...18.4) % and CH<sub>4</sub>=(0.03...0.16) %. The possibility of using the NASA CEA program, intended for operational calculations of equilibrium chemistry, for engineering calculations of the material composition of synthesis gas of industrial furnace equipment, is shown.

**Keywords:** rotary kiln, cooler drum, carbon-containing material, heat treatment, gasification, syngas, numerical simulation.

#### References

- Liu, X. J., Zhang, W. R., Park, T. J. (2001). Modelling coal gasification in an entrained flow gasifier. *Combustion Theory and Modelling*, 5 (4), 595–608. doi: <https://doi.org/10.1088/1364-7830/5/4/305>
- Choi, Y. C., Li, X. Y., Park, T. J., Kim, J. H., Lee, J. G. (2001). Numerical study on the coal gasification characteristics in an entrained flow coal gasifier. *Fuel*, 80 (15), 2193–2201. doi: [https://doi.org/10.1016/s0016-2361\(01\)00101-6](https://doi.org/10.1016/s0016-2361(01)00101-6)
- Shi, S.-P., Zitney, S. E., Shahnam, M., Syamlal, M., Rogers, W. A. (2006). Modelling coal gasification with CFD and discrete phase method. *Journal of the Energy Institute*, 79 (4), 217–221. doi: <https://doi.org/10.1179/174602206x148865>
- Watanabe, H., Otaka, M. (2006). Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier. *Fuel*, 85 (12-13), 1935–1943. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.02.002>
- Wu, Y., Zhang, J., Smith, P. J., Zhang, H., Reid, C., Lv, J., Yue, G. (2010). Three-Dimensional Simulation for an Entrained Flow Coal Slurry Gasifier. *Energy & Fuels*, 24 (2), 1156–1163. doi: <https://doi.org/10.1021/ef901085b>
- Liu, H., Cattolica, R. J., Seiser, R. (2017). Operating parameter effects on the solids circulation rate in the CFD simulation of a dual fluidized-bed gasification system. *Chemical Engineering Science*, 169, 235–245. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.040>
- Zhang, Y., Lei, F., Xiao, Y. (2015). Computational fluid dynamics simulation and parametric study of coal gasification in a circulating fluidized bed reactor. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 10 (2), 307–317. doi: <https://doi.org/10.1002/apj.1878>
- Zhong, W., Yu, A., Zhou, G., Xie, J., Zhang, H. (2016). CFD simulation of dense particulate reaction system: Approaches, recent advances and applications. *Chemical Engineering Science*, 140, 16–43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.09.035>
- Wu, Y., Liu, D., Ma, J., Chen, X. (2017). Three-Dimensional Eulerian–Eulerian Simulation of Coal Combustion under Air Atmosphere in a Circulating Fluidized Bed Combustor. *Energy & Fuels*, 31 (8), 7952–7966. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01084>
- Sharma, V., Agarwal, V. K. (2019). Numerical simulation of coal gasification in a circulating fluidized bed gasifier. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 36 (3), 1289–1301. doi: <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190363s20180423>
- Peng, L., Wu, Y., Wang, C., Gao, J., Lan, X. (2016). 2.5D CFD simulations of gas–solids flow in cylindrical CFB risers. *Powder Technology*, 291, 229–243. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.018>
- Chui, E. H., Majeski, A. J., Lu, D. Y., Hughes, R., Gao, H., McCalden, D. J., Anthony, E. J. (2009). Simulation of entrained flow coal gasification. *Energy Procedia*, 1 (1), 503–509. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.067>
- Panov, E. N., Karvatskii, A. Y., Shilovich, T. B., Lazarev, T. B., Moroz, A. S. (2014). Mathematical Model of Solid-Fuel Gasification in a Fluidized Bed. *Chemical and Petroleum Engineering*, 50 (5-6), 312–322. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-014-9900-3>
- Anetor, L., Osakue, E., Odetunde, C. (2012). Reduced Mechanism Approach of Modeling Premixed Propane-Air Mixture Using ANSYS Fluent. *Engineering Journal*, 16 (1), 67–86. doi: <https://doi.org/10.4186/ej.2012.16.1.67>
- Gri mech 3.0 chemkin. Available at: <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/files30/grimech30.dat>
- Cantera is an open-source suite of tools for problems involving chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. Available at: <https://cantera.org/>
- Slavinskaya, N., Braun-Unkhoff, M., Frank, P. (2008). Reduced Reaction Mechanisms for Methane and Syngas Combustion in Gas Turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 130 (2). doi: <https://doi.org/10.1115/1.2719258>
- ANSYS. Available at: <https://www.ansys.com/>
- MFIX. Available at: <https://mfix.netl.doe.gov/>
- McBride, B. J., Gordon, S. (1996). Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications II. Users Manual and Program Description. NASA RP 1311. National Aeronautics and Space Administration.
- Chalyh, E. F. (1972). *Tehnologiya i oborudovanie elektrodnyh i elektrougol'nyh predpriyatiy*. Moscow: Metallurgiya, 432.
- Westbrook, C. K., Dryer, F. L. (1981). Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames. *Combustion Science and Technology*, 27 (1-2), 31–43. doi: <https://doi.org/10.1080/00102208108946970>
- Tahir, F., Ali, H., Baloch, A. A. B., Jamil, Y. (2019). Performance Analysis of Air and Oxy-Fuel Laminar Combustion in a Porous Plate Reactor. *Energies*, 12 (9), 1706. doi: <https://doi.org/10.3390/en12091706>
- ParaView. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application. Available at: <http://www.paraview.org/>

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209778

**INVESTIGATION OF STEAM GENERATION PERFORMANCE ON CONICAL CAVITY RECEIVER BY DIFFERENT GEOMETRIC CONCENTRATION RATIOS FOR FRESNEL LENS SOLAR CONCENTRATOR (p. 6–14)**

A. Asrori, S. Soeparman, S. Wahyudi, D. Widhiyanuriyawan

У статті обговорюється порівняння продуктивності парогенераторів в великих і малих приймачах, що використовують концентратор на лінзах Френеля.

Мета полягає в тому, щоб отримати оптимальне значення ефективності парогенератора великих і маленьких приймачів з урахуванням наступних деталей завдання:

- розробити приймач з конічною порожниною, що має найбільш ефективний геометричний коефіцієнт концентрації;
- порівняти теплову ефективність приймачів з конічною порожниною, що мають різні геометричні коефіцієнти концентрації;
- проаналізувати потенціал парової енергії приймача з конічною порожниною, виробленої концентратором на лінзах Френеля з оргскла, виходячи з величини середнього випромінювання безпосередньо на місці дослідження.

У дослідженні використовується метод експериментально-польових досліджень, які проводяться на відкритому повітрі. Дане дослідження проводилося в лабораторії перетворення енергії Universitas Brawijaya (широта: 7,9553° S і довгота: 112,6145° W) у вересні 2019 року. Для сонячних теплових концентраторів використовується лінза Френеля з оргскла. Два порівнюваних приймача з конічною порожниною виготовлені з міді об'ємом 2 літри і 0,25 літра відповідно. Вони покриті ізоляцією з скловати товщиною 10 мм. Спрямована нормально до поверхні щільність радіації ( $I_n$ ) вимірюється вимірником сонячної енергії. Чашковий анемометр використовується для вимірювання швидкості вітру ( $v_w$ ) навколо приймача. Для вимірювання температури використовується Digi-Sense 12-канальний скануючий настільний термометр, підключений до ноутбука. Положення чотирьох термодатчиків типу К виглядають наступним чином:

- температура навколишнього середовища ( $T_c$ );
- температура фокусної точки ( $T_f$ );
- температура стінки приймача ( $T_n$ );
- температура пари/води ( $T_w$ ).

Для вимірювання тиску пари, що надходить в мірну склянку, використовувався манометр. Про досягнення тиску насичення ( $P_{нас}$ ) буде свідчити процес конденсації через мідну котушку, яка служить в якості конденсатора.

З результатів дослідження випливає, що великі приймачі мають технічні характеристики  $CR_g=8$  і обсяг 2 л води. У той час як малі приймачі  $CR_g=30$  і 0,25 л. Великі приймачі можуть виробляти приховану парову теплову енергію  $Q_{п}=1.37$  МДж за цикл з ефективною потужністю (ефективність використання)  $\eta_{Тн}=31,81$  %. Тоді як малий приймач може виробляти парову енергію  $Q_{п}=579,17$  кДж за цикл з ефективною потужністю  $\eta_{Тн}=33,31$  %. Отже, з двох типів приймачів з конічною порожниною можна рекомендувати малі приймачі, що мають більш високу ефективність, ніж великі.

**Ключові слова:** продуктивність пари, лінза Френеля, сонячний концентратор, конічна порожнина, приймач, температура, спрямована нормально до поверхні щільність радіації, геометричний коефіцієнт концентрації, прихована теплота, ефективність.

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210684

**DEVELOPMENT OF A SOIL REGENERATOR WITH A GRANULAR NOZZLE FOR GREENHOUSES (p. 14–20)**

I. Boshkova, N. Volgusheva, A. Solodka, I. Mukminov, O. Bondarenko

Представлені результати розробки теплообмінного апарату регенеративного типу для теплиць. Створення ґрунтового регенератора обумовлено енергетичною та економічною доцільністю. У весняний період в денний час повітря в теплицях інтенсивно нагрівається від сонячного випромінювання, а в нічний може охолотитися нижче припустимої температури. Акумуляція теплоти в денний час і використання цієї теплоти в нічний час знизить необхідність в підігрівачах аж до повного їх виключення. Ґрунтовий регенератор містить щільний шар гранульованого матеріалу, що продувається повітрям з внутрішнього простору теплиці. Таке рішення дозволяє істотно інтенсифікувати теплообмін. Для визначення середнього коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну отримана емпірична залежність, що враховує вплив тривалості процесу теплообміну. Розроблено методику теплового конструкторського розрахунку регенератора, в результаті якої визначаються основні геометричні характеристики теплообмінної ділянки. Представлені результати розрахунку ґрунтового регенератора для теплиці з площею поверхні 18 м<sup>2</sup> для умов теплового континентального клімату. Розроблений ґрунтовий регенератор містить 5 каналів довжиною 5,75 м, заповнених щебенем. Отримано, що для середнього потоку сонячного випромінювання  $Q_c=2160$  Вт і тривалості роботи ґрунтового регенератора  $\tau_2=6$  годин акумульована теплота може в нічний час витратитися протягом 2,5 годин при середній температурі навколишнього середовища  $t_1=7$  °C. При підвищенні температури навколишнього середовища час роботи регенератора буде збільшуватися. Запропонований ґрунтовий регенератор характеризується простотою конструкції, а його використання призведе до зниження витрат енергії на підтримку температурного режиму в теплиці.

**Ключові слова:** сонячне випромінювання, акумуляція теплоти, методика теплового розрахунку, коефіцієнт міжкомпонентного теплообміну.



---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210752****UNIFORM LARGESIZED LUMBER DRYING SYSTEM USING MW RADIATION AND BASING ON A SINGLE-WIRE E<sub>00</sub> WAVE ENERGY TRANSMISSION LINE (p. 21–28)****E. Ritter, V. Kismereshkin, J. Cieslik, A. Savostin, D. Ritter, A. Aytulina, I. Kasimov, B. Bekkozina**

З метою узагальнення можливостей використання НВЧ-випромінювання в промислових процесах в даній статті розглядаються і аналізуються різні методи сушіння деревини. Обґрунтовано технологічні та економічні переваги сушіння деревини в надвисокочастотному електромагнітному полі. Сушіння деревини в діапазоні надвисоких частот вважається найбільш оптимальним на відміну від традиційних методів. Цей метод заснований на проникненні електромагнітної енергії в матеріал і перетворенні її в тепло.

У статті розкривається можливість більш ефективного використання НВЧ-випромінювання. Пропонується спосіб сушіння деревини та великогабаритних пиломатеріалів на основі однопровідної лінії передачі електромагнітної енергії поверхневої хвилі. У статті також описані переваги запропонованого методу: використання одинарного проводу, покритого тонким шаром діелектричного матеріалу, використання вібраційної системи для збудження поверхневих хвиль і використання плоского відбивача. Особлива увага приділяється площі контакту проводу з плоским відбивачем, оскільки досконалість цього контакту багато в чому визначає ефективність збудження поверхневих хвиль. Проведені дослідження дозволили оцінити вплив параметрів системи збудження поверхневої вібраційної хвилі в одинарному хвилеводі на ефективність її збудження. Запропонований пристрій збудження коливань дозволяє досить просто поетапно регулювати теплову потужність в опромінюваному об'єкті.

Конструкція розсіювального навантаження для ліній поверхневих хвиль була успішно апробована в ході лабораторних робіт, де були запропоновані певні способи утилізації незатребуваної електромагнітної енергії.

За результатами проведених досліджень запропонована фізична модель системи мікрохвильового сушіння деревини та великогабаритних пиломатеріалів.

**Ключові слова:** мікрохвильове сушіння пиломатеріалів, однопровідна лінія передачі, збудження поверхневих хвиль, розсіювальне навантаження.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210263****DEPENDENCE OF THE INTERNAL WAVE ENERGY FLUX ON THE PARAMETERS OF A TWOLAYER HYDRODYNAMIC SYSTEM (p. 28–36)****Yu. Hurtovyi, O. Avramenko, V. Naradovyi**

Дослідження проводиться для аналізу потоку енергії внутрішніх гравітаційно-капілярних хвиль у двошаровій гідродинамічній рідкій системі з кінцевими товщинами шарів. Задача розглядається для ідеальної нестисливої рідини в полі сили тяжіння, а також з врахуванням сил поверхневого натягу. Постановку задачі здійснено в безрозмірному вигляді для малих значень коефіцієнта нелінійності. Детально досліджено дисперсію гравітаційних-капілярних прогресивних хвиль в залежності від коефіцієнту поверхневого натягу та відношення густин шарів. Доведено, що із зростом хвильового числа групова швидкість починає випереджати фазову, причому їх рівність відбувається на мінімумі фазової швидкості. Обчислено та графічно проаналізовано залежність повного середнього потоку енергії від хвильового числа (довжини хвилі) та товщини рідких шарів для різних значень фізичних величин, зокрема густини та коефіцієнту поверхневого натягу. З аналізу випливає, що потік енергії гравітаційних внутрішніх хвиль при збільшенні товщини нижнього шару зростає до деякого максимального значення, а потім наближається до певного граничного значення. Для капілярних хвиль потік енергії внутрішніх хвиль майже не залежить від товщини нижнього шару. Також показано, що середній потік енергії для гравітаційних хвиль при стабільній амплітуді майже не залежить від довжини хвилі. Навпаки, для капілярних хвиль потік енергії різко зростає при збільшенні хвильового числа.

Результати аналізу потоку енергії внутрішніх прогресивних хвиль дозволяють якісно оцінювати фізичні характеристики при розробці екологічних технологій, які використовують в якості джерела енергії внутрішні хвильові рухи у різноманітних водних середовищах.

**Ключові слова:** потік енергії, внутрішні прогресивні хвилі, двошарова гідродинамічна система, аномальна дисперсія.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.208333****ANGULAR MOMENTUM TEARING MECHANISM INVESTIGATION THROUGH INTERMOLECULAR AT THE BUBBLE INTERFACE (p. 37–47)****Tri Tjahjono, I. N. Gede Wardana, Mega Nur Sasongko, Agung Sugeng Widodo**

Двофазний потік з газорідним компонентом широко застосовується в промисловості, зокрема в процесі переробки рідких продуктів. Нафтопродукти з вмістом бульбашок небажані в процесі виробництва. У даній роботі описується дослідження механізму процесу, пов'язаного з розривом бульбашок при двофазному уприскуванні в стоячу воду. Розроблено аналітичну модель на основі силового механізму потоку води на межі розділу бульбашки. Інерційна сила потоку води безперервно штовхає бульбашку, в той час як сила опору чинить опір їй. Бульбашка змінює форму, що впливає на гідродинамічний потік навколо бульбашки. Вихори з високою щільністю енергії вдаряють і створюють межу розділу напруг понад міцності, внаслідок чого межа розділу розривається. Експеримент проводився шляхом спостереження в середній частині уприскуваного потоку. Було встановлено, що процес утворення бульбашкового розриву можна пояснити наступними етапами:

1) модель розгортки, бульбашка, що штовхається інерційною силою потоку води. В'язка сила води зрушує поверхню бульбашки. Під дією обох сил бульбашка змінює свою форму. Потім поблизу хвоста бульбашки починає з'являтися кінцевий вихор. Другий по-

тік води знаходиться навколо бульбашки, що підсилює щільність вихрової енергії, яка змушує фрагменти відділятися від вихідної бульбашки;

2) модель розтягування, бульбашка має високу імпульсну силу при проникненні в стоячу воду, і кінці бульбашки розтягуються інерційною силою бульбашки і в'язкою силою води. Поверхня бульбашки зазнала розтягнення і розрив і стала розщеплюватися. Виходячи з отриманих результатів, процес розриву сильно залежить від імпульсу потоку води, який запускає вторинний потік як початковий процес вихрового потоку, що викликає розрив поверхні бульбашки за рахунок кутового моменту.

**Ключові слова:** інерційна і в'язка сила, кутовий момент, стояча вода, щільність енергії, межа розділу бульбашки.

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209762**

**ON USING THE ANSYS FLUENT SOFTWARE FOR CALCULATING THE PROCESS OF BURNING A MIXTURE OF PARTICLES FROM DIFFERENT TYPES OF SOLID FUELS (p. 48–53)**

**M. Nekhamin, I. Bezennyi, N. Dunayevska, V. Vyfatnuik**

Використання в існуючих парогенераторах ТЕС в якості палива бінарних сумішей твердого палива обумовлено різними причинами, такими як поліпшення умов займання, можливими екологічними перевагами спалювання бінарних сумішей. Оскільки існуючі котли ТЕС розраховувалися на спалювання одного виду твердого палива, очевидна актуальність чисельного моделювання процесів горіння бінарних сумішей.

До числа програмних засобів, широко використовуваних для опису і аналізу роботи енергетичних пристроїв, відноситься програма ANSYS FLUENT, в документації якої не описана методика її використання для моделювання горіння твердопаливних сумішей.

Для застосування програми з цією метою в першому підході суміш твердих палив замінена одним вугіллям з усередненими характеристиками. Наближений характер такої моделі впливає з неможливості відтворити взаємовплив компонентів суміші. Другий підхід використовує можливість програми ANSYS FLUENT враховувати додаткове паливо – рідке або газоподібне – для завдання замість нього другого твердого палива.

Застосування цих підходів до опису процесу горіння сумішей антрациту і газового вугілля в різних співвідношеннях і з різними розмірами часток показало схожість параметрів. При цьому використання другого підходу продемонструвало вплив добавки газового вугілля на поля інтенсивності горіння антрациту, що узгоджується з відомим фактом інтенсифікації процесу горіння менш активного компонента суміші при добавці активнішого.

Для апробації моделювання за другим підходом були розраховані в тривимірному наближенні процеси в топці котла ТПП-210А при заміні пісного вугілля сумішшю газового вугілля з антрацитом. Близькість отриманих параметрів узгоджується з відомими даними випробувань і підтверджує достатню коректність моделювання горіння суміші вугілля.

**Ключові слова:** Ansys Fluent, CFD моделювання, тверде паливо, суміш, газове вугілля, пісне вугілля, антрацит.

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.208440**

**A THEORETICAL STUDY OF STABILITY OF SOLID FUEL BURNING WITH A TWOPHASE GASIFICATION AREA (p. 54–65)**

**V. Volkov, N. Makoyed, Yu. Loboda, O. Sokolova**

Теоретично досліджено стійкість горіння твердого палива, що в процесі спалювання розкладається за схемою «тверда фаза – рідка фаза – газ». Побудовано фізичну та математичну моделі процесу розповсюдження малих збурень при горінні. Середовище в усіх областях горіння і в продуктах згорання вважається нестисливим, враховується в'язкість палива в його рідкій фазі. При цьому розглянуто збурення гідродинамічних параметрів не тільки в двофазній зоні газифікації, але й в області продуктів згорання, а також є заданим геометричне збурення фронту миттєвого згорання (подум'я), яке викривляє форму його поверхні, що є характерною особливістю представленої в дослідженні фізичної моделі. Поставлено і розв'язано математичну задачу на власні значення, яку зведено до алгебраїчного характеристичного рівняння відносно безрозмірного комплексного власного числа, додатність дійсної частини якого визначає нестійкість. Доведено, що в граничному випадку відсутності рідкої фази має місце абсолютна нестійкість. В іншому граничному випадку – для збурень з нескінченною довжиною хвилі – спостерігається перехід до стійкості. Останній факт свідчить про те, що наявність в'язкої рідинної плівки і змінність протяжності зони газифікації під впливом збурень значно впливають на горіння твердого палива, суттєво стабілізуючи цей процес. У загальному випадку аналітично визначено достатню умову нестійкості коренів характеристичного рівняння. Фізична інтерпретація математичних результатів дає можливість пояснити процеси автотурбулізації горіння твердого палива і можливий перехід горіння в дефлаграційний вибух або в детонацію. Результати дослідження на якісному рівні відповідають експериментальним даним і додатково можуть бути використані для теоретичного аналізу стійкості процесу горіння рідкого палива в камері згорання.

**Ключові слова:** горіння твердого палива, газифікація палива, нестійкість горіння, дефлаграційний вибух, детонація.

**DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210767**

**DETERMINATION OF PARAMETERS OF THE CARBONCONTAINING MATERIALS GASIFICATION PROCESS IN THE ROTARY KILN COOLER DRUM (p. 65–77)**

**A. Karvatskii, T. Lazarev, S. Leleka, I. Mikulionok, O. Ivanenko**

Проведено оцінку доцільності застосування діючого обладнання барабана-охолоджувача обертової печі для термооброблення вуглецевмісного наповнювача для одержання синтез-газу з використанням відходів виробництва у вигляді пилової фракції термо-

обробленого нафтового коксу або антрациту. Сформульовано математичну модель процесу газифікації частинок вуглецю в континуально-дискретній постановці, що включає тринадцять глобальних реакцій, з яких чотири – гетерогенні і дев'ять – гомогенні. Розроблено числову модель газифікації пилової фракції вуглецевмісного наповнювача в барабані-охолоджувачі обертової печі у вісесиметричному формулюванні. Досліджено збіжність числового розв'язку задачі газифікації за кроком сітки. Встановлено, що розрахункова сітка, яка включає 73620 комірок і 75202 вузлів, призводить до похибки визначення основних параметрів моделі не більше 1–2 %. Виконано верифікацію розробленої числової моделі. Встановлено, що різниця між молярними частками CO і H<sub>2</sub>, значення яких одержано за різних програмних продуктів (Fluent, CEA NASA), перебуває в межах (2,8...5,8) %. З використанням розробленої числової моделі процесу газифікації вуглецевмісного наповнювача в барабані-охолоджувачі обертової печі визначено кількісний склад горючих компонентів синтетичного газу за різних вихідних параметрів. Встановлено, що за умови співвідношення O<sub>2</sub>/C=(42,7...51,6) % прогнозований кількісний склад горючих газів синтез-газу в молярних частках складає: CO=(32,8...36,9) %, H<sub>2</sub>=(17,1...18,4) % і CH<sub>4</sub>=(0,03...0,16) %. Показано можливість застосування програми CEA NASA, призначену для оперативних розрахунків рівноважної хімії, для інженерних розрахунків матеріального складу синтез-газу промислового пічного обладнання.

**Ключові слова:** обертова піч, барабан-охолоджувач, вуглецевмісний матеріал, термооброблення, газифікація, синтез-газ, числове моделювання.