

БИОТЕХНОЛОГИИ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

IRSTI 34.35.51

https://doi.org/10.53939/1560-5655_2025_2_9

**Zhubanova A.A.¹, Nussipov D.A.¹, Kamenov B.K.¹, Kozhakhmetova M.H.¹,
Aimagambetov A.T.¹, Arystanbekuly B¹, Xiangrong L.²**

¹SRI «Ecology and Sustainability of Bioresources», Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty c., Kazakhstan

²College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an c., China

DEVELOPING CHEMICAL AND BIOCHEMICAL SOLUTIONS TO REDUCE CARBON FOOTPRINTS AND RESTORE ECOSYSTEMS THROUGH WASTE RECYCLING

Abstract. The article provides an overview of modern approaches to the processing of agricultural and man-made waste aimed at reducing the carbon footprint and restoring ecosystems. The main focus is on chemical and biochemical solutions, such as the production of biochar, biogas and optimization of pyrolysis processes. Special emphasis is placed on the use of biochar for the adsorption treatment of industrial wastewater, which helps to reduce pollution and rational use of resources. The prospects of increasing the share of renewable energy in the energy balance of Kazakhstan and reducing dependence on fossil fuels are considered. The expected research results include the development of certified products, the patenting of innovative technologies and their implementation in production processes. The importance of training highly qualified specialists and publishing scientific articles is also emphasized, which contributes to scientific and technical development. The article demonstrates the contribution to the promotion of environmentally sustainable technologies that meet the global challenges of climate change.

Keywords: microorganisms, sorption, pyrolysis, bioconversion, briquette, biofuels.

Introduction. The program aims to develop innovative waste recycling technologies to reduce the carbon footprint and restore ecosystems. Sustainable waste management is becoming especially relevant in the context of climate change and the growing environmental crisis. The main focus is on the processing of industrial and agricultural waste into useful products, including biofuels, energy and materials, which helps reduce dependence on fossil sources and supports the “green economy”.

The program addresses the challenges of developing promising methods of pyrolysis, using biochemical processes to obtain energy and clean polluted ecosystems. These technologies are capable of not only improving the environmental situation, but also becoming the basis for the international implementation of sustainable solutions.

The partnership between scientific and industrial organizations enhances the program's potential, ensuring its integration into the national economy. Joint research and development of applied technologies will help achieve environmental and energy goals, minimizing the impact on the environment and creating a basis for scaling innovative solutions globally.

Research methods and results. The ever-increasing use of traditional energy sources and the resulting increase in environmental pollution challenge humanity to find alternative energy sources. In addition, the world population is growing at an alarming rate; according to UN forecasts, by 2050 the planet's population will reach approximately ten billion people. This will inevitably lead to a significant increase in energy demand, by approximately 24 billion tons of coal equivalent annually [1]. Given the growth of environmental problems and energy prices, the development and implementation of alternative energy sources are becoming a critical area in the energy sector of the future. Particular attention is paid to the production of biofuels, including ethanol, biodiesel and biogas, from renewable energy sources [2]. The International Energy Agency (IEA) notes that more than 80% of the world's primary energy supplies come from fossil fuels, the main source of anthropogenic carbon dioxide emissions, which are the main factor in global warming [3]. Therefore, reducing global CO₂ emissions by at least 50% compared to 2000 levels by 2050, as indicated by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), is a prerequisite for a sustainable future [4]. The electricity sector, which produces about 42% of all CO₂ emissions, is actively researching technological solutions that can reduce emissions [5].

Just like the inevitable problems in the energy sector, plastic pollution, which is characterized by its widespread distribution and long decomposition time, poses a serious threat to environmental sustainability and human health. Plastic, which has such valuable properties as lightness, strength, good rigidity, versatility in manufacture, good thermal insulation, low electrical/thermal conductivity and corrosion resistance [6,7], is widely used in various sectors. However, its impact on the environment is catastrophic. It is estimated that about 4% of the world's oil

and gas production goes to the production of plastic, which also increases the volume of harmful emissions [7]. The annual global production of plastic exceeds 359 million tons, and although it offers many benefits, it also creates serious environmental problems. Microplastic particles spread in the atmosphere, water bodies and soil, causing negative effects on human and animal health, such as cardiovascular diseases, chronic kidney diseases, and other diseases [6,7].

The problems of agricultural and industrial waste disposal are acute not only for Kazakhstan, but also for many other countries. Throughout the world, the accumulation of agricultural and industrial waste causes serious environmental problems, including water, soil and air pollution, as well as a threat to biodiversity. In the agricultural sector, huge volumes of agricultural waste, such as corn stalks, wheat straw and other plant residues, are often burned or buried, which leads to the release of methane and carbon dioxide into the atmosphere. These gases are significant factors in global warming.

Industrial waste, including coal dust and metallurgical slag, also poses a significant problem. Without proper processing, these materials can have a toxic effect on the environment, polluting land and water resources with heavy metals and other harmful substances. Therefore, finding effective methods for the disposal of such waste is becoming a priority in sustainable development strategies. The development and implementation of technologies that can transform agricultural and industrial waste into useful resources, such as biofuels, building materials or even renewable energy sources, is a key element in reducing the environmental burden and maintaining the ecological balance.

The program stands out for its innovative approach to processing agricultural and industrial waste, transforming it into useful products: biofuel, building materials and energy. These technologies significantly reduce waste volumes and carbon footprint, supporting environmentally friendly and sustainable solutions. Particular attention is paid to the development of cost-effective technologies that meet global goals of combating climate change and transition to a "green economy". The program is important not only for local environmental issues, but also for achieving energy independence and sustainable development at the international level. To solve environmental problems, the development of an effective technology for producing biogas from agricultural waste is a key area. This process allows not only to reduce the volume of agricultural waste, but also to turn it into a valuable source of renewable energy, thereby contributing

to sustainable development and reducing carbon emissions. Among the promising sources of bioenergy, agricultural lignocellulosic biomass is the main source of various organic bioproducts (organic acids, food additives, enzymes, etc.), and it is also a good biofuel due to its biochemical composition consisting of sugars and other valuable components. The transformation of agricultural waste, namely wheat straw, corn stalks, rice straw, sugar beet cake, etc. into biogas can serve as a promising substitute for solving the bulk of energy problems. Lignocellulosic biomass is an inexhaustible and abundant renewable resource that is constantly replenished through photosynthesis. It includes a significant portion of agricultural crop waste, energy crops, animal manure, municipal solid waste (MSW), and forest residues [8]. These cost-effective renewable energy sources are available in large quantities. In turn, their excessive accumulation can lead to environmental problems, and if they are not used and improperly disposed of, this will lead to a significant loss of valuable bioresources. The above determines the interest in the processes of conversion and use of agricultural lignocellulosic biomass for energy/electricity production through direct and indirect conversion pathways. The total energy consumption worldwide per year is a quarter of the rate of cellulose synthesis by plants and algae (8.5×10^{10} t/annual equivalent) [9]. Direct combustion for heat and electricity production is a classic way of using biomass for energy [10]. However, the process of anaerobic digestion or biomethanization is an effective way to convert huge biomass such as animal manure, lignocellulosic agricultural residues, forestry waste, municipal and food waste, etc., into biogas under the influence of various groups of microbial populations under anaerobic conditions [11].

However, anaerobic digestion of various organic biomasses is a relatively sensitive process, which mainly depends on the substrate compounds that can be converted into biogas: the chemical composition and biodegradability of biomass are key factors for biogas production. Many studies have focused on the anaerobic digestion process using monosubstrates. However, in recent years, research has been actively carried out on biogas production through anaerobic co-digestion (ACD) of agricultural waste and manure. For example, Cavinato et al. conducted co-digestion of cattle manure, agro-waste and energy crops [12]; Kacprzak et al. analyzed the co-digestion of agricultural waste and MSW [13]. Callaghan et al. optimized the co-digestion process by using three types of feedstock: cattle manure, chicken manure and fruit and vegetable waste [14]. Muradin and Foltynowicz conducted an economic analysis of

a biogas plant that processed nine types of feedstock (i.e., corn silage, potato pulp, wine waste, fruit and vegetable pomace, cereals, plant tissue waste, municipal sludge, and soybean oil) [15]. ABD is an economically viable process and can provide effective synergies in the reactor. The sharp increase in the number of publications on ABD in recent decades indicates that the anaerobic digestion process is receiving increasing attention and increasing biogas production is one of the most pressing research topics.

An important area of research is also the use of phototrophic microorganisms, such as microalgae, which can be used to capture carbon dioxide and produce biofuels. These microorganisms are capable of absorbing significant amounts of CO₂, making them a valuable tool in the fight against global warming. They can also be used to purify wastewater, removing toxic substances and nutrients, preventing eutrophication of water bodies and promoting the production of environmentally friendly energy [16]. The research group has sufficient experience in the field of biotechnology of phototrophic microorganisms, including in the field of research into their potential to purify aquatic ecosystems polluted with various toxicants, and the scientific group is also conducting research to find and isolate microalgae strains that are promising producers or raw materials for the production of environmentally friendly types of biofuels. The team has a large reserve in the field of microalgae research, their morphological and physiological-biochemical features and has extensive experience in cultivating microalgae, obtaining various biologically active substances and dietary supplements on their basis. The research group has received patents and published articles in highly rated international journals and textbooks, which confirms the existing sufficient experience for the implementation of the proposed program. Also, the biotechnology laboratory has a collection of phototrophic microorganisms, including more than 50 pure strains of microalgae and cyanobacteria, 20 strains of which were obtained and deposited in the RCM.

In substantiating the scientific novelty and innovativeness of the proposed program, it should be noted that one of the program's objectives is to develop an innovative low-waste technology for using microalgae biomass in wastewater and flue gas purification processes with parallel production of biomass as a raw material for biofuel production. It is planned to conduct research on the selection of stable phototrophic microorganisms to form a consortium, a comprehensive study of the consortium's ability to use flue gas CO₂, as well as absorb and accumulate metals and organic

matter. Considering the fact that phototrophic organisms are the fastest growing and most energy-efficient crops, it is advisable to analyze the energy potential of biomass obtained incidentally during the purification of industrial waste.

The proposed program has no similar analogues in Kazakhstan. In Kazakhstan, a limited number of studies are devoted to such biotechnological areas of using microalgae as their mass cultivation for obtaining feed additives and use in wastewater treatment from pollutants with subsequent use of this biomass in biodiesel production. The existing significant number of studies devoted to studying the mechanisms of plant resistance to TM mostly concerns terrestrial species; the resistance of aquatic phototrophic microorganisms to metals has been studied to a limited extent, despite their widespread use in wastewater treatment systems.

It should be noted that the proposed program has the potential to become an important element of global efforts to ensure the sustainability of nature and preserve its resources, so we draw your attention to the importance of its development in our country for the restoration of biodiversity in aquatic ecosystems. The problems of pollution of domestic and industrial wastewater due to anthropogenic impact, air pollution, climate change due to excessive release of carbon dioxide into the atmosphere are relevant and widespread throughout the planet. But despite the measures taken and the current methods available, it is necessary to search for innovative approaches and green technologies for more efficient purification of water resources from various types of pollutants and the transition to environmentally friendly fuels. Despite a number of unconditional advantages, modern physicochemical methods of cleaning environmental objects are burdened with significant disadvantages, such as complex regulation of the mode when using coagulants and flocculants, low efficiency, preliminary stages of purification, the formation of highly toxic eluates during sorption, requiring additional destruction, and others. The expected results of the program can serve as a basis for developing an alternative method for restoring environmental objects and switching to innovative technologies characterized by a low carbon footprint. The use of a consortium of phototrophic microorganisms has advantages such as cost-effectiveness, extraction of large quantities of xenobiotics due to the optimal ratio of the treated surface area to the volume, as well as reduced formation of chemical and biological sediments that must be removed.

In the field of plastic and man-made waste management, key recycling

methods are highlighted to minimize the environmental impact. There are four main recycling routes for solid plastic waste, namely, re-extrusion as a primary treatment, mechanical treatment as a secondary measure, chemical treatment as a tertiary measure, and energy recovery as a quaternary measure. Pyrolysis oil has properties close to clean fuel and is therefore a substitute for fresh fossil fuels for power generation, transportation, and other applications. The study found that pyrolysis of plastic waste offers an alternative way to utilize plastic waste and an alternative source of fossil fuels to reduce the overall demand for virgin oil. Through plastic pyrolysis, plastic waste is thermally converted into fuel by decomposing long-chain polymers into small complex molecules in the absence of oxygen, making this process technically and economically feasible for recycling plastic waste. The advantage of this process is that no pre-sorting is required and plastic waste can be fed directly without pre-treatment before the process. The products of plastic pyrolysis are pyrolysis oil, a hydrocarbon-rich gas with a calorific value of 25–45 MJ/kg, making it ideal for process energy recovery. Consequently, pyrolysis gas can be returned to the process to recover energy for process heating, significantly reducing the dependence on external heating sources [17].

The problems of agricultural waste disposal are relevant not only for Kazakhstan, but also for many countries around the world that are faced with the need for sustainable waste management. In Kazakhstan, for example, such valuable resources as rice husks and chicken manure are practically not used, although these wastes can be processed into adsorbents used to purify various types of water: industrial, drinking, waste and industrial. Given the importance of the problem for protecting the health of the population of Kazakhstan, the Institute of Coal Chemistry and Technology LLP has obtained preliminary samples of carbon adsorbents based on rice husks, straw, oilcake, chicken manure, plastic waste [18], as well as a complex fertilizer from oxidized coal of Kazakhstan. The adsorbents have undergone preliminary laboratory tests for the purification of drinking and waste sewage water taken from the State Enterprise Astana Su Arnasy (Astana).

Another direction for reducing emissions is briquetting of industrial waste. Briquetting of carbon-containing waste, including coal fines and biomass, is an effective method of processing, turning them into compact fuel briquettes with high energy value, which are easy to use and transport. There are two methods of coal briquetting: without binders, at high pressing pressure (above 80 MPa), and with a binder, at low pressing

pressures (15-25 MPa). The first method is used to briquette young (soft) brown coals and peat, the second method is used to briquette fines of hard and old (hard) brown coals, anthracite fines, semi-coke and coke fines [19].

Over the years, various binders have been used in the production of briquettes. They can be classified into several categories, depending on the temperature at which the briquettes are formed, or on the temperature of the primary heat treatment of the briquettes, or on the temperature of the final treatment. The cost of binders that ensure low-temperature briquetting is much higher than the price of binders that provide for high-temperature treatment, but low-temperature briquetting reduces capital costs and installation complexity. High-temperature processes occur at temperatures from 450 to 850 °C, resulting in sintering of the particles into a briquette. Low-temperature processes occur at temperatures up to 250 °C.

One of the most promising areas at present is considered to be biomass briquetting. There are combined technologies that combine the processing of solid fossil fuels and biomass. The introduction of porous renewable carbon-containing waste into the briquette not only solves environmental problems and reduces the cost of the commercial product, but also helps improve combustion kinetics.

The process of pressing organic waste into fuel briquettes has many advantages, including ease of transportation and storage, more consistent feeding into conversion equipment, and higher thermal conversion efficiency compared to loose biomass. The density and strength of fuel briquettes are of great importance, since low-quality briquettes may disintegrate and crumble back into the original materials during processing or storage, which in turn may negate the advantages of briquetting [20]. The addition of binders or agents to loose biomass residues before compaction is considered as one of the ways to eliminate such disadvantages and reduce production costs [21, 22]. However, due to the negative effects of using some binders in both compaction and combustion of briquettes, the development of more effective and sustainable binders for briquetting organic waste is necessary.

Microalgae have potential to be used as a binding material due to their high protein content and significant lignin content. In the presence of moisture, microalgae residues secrete a protein-binding substance that acts as a glue between particles of loose biomass, forming strong bridges and filling voids [23]. The use of microalgae as a binding component for

briquettes has gained great interest and has been the subject of extensive research in recent years, since this type of bio-energy resource can capture carbon for growth, be grown using wastewater, and can also have a high lipid content. Ensuring efficient energy and carbon recovery from microalgae residues is important for ensuring the environmental and economic sustainability of microalgal biofuels.

Biomass gasification is a key method of converting solid fuels into more usable forms of energy. Biomass, like coal, is traditionally used in a solid state, which may not be as convenient as using gaseous or liquid fuels. However, modern technology can efficiently convert biomass into gas or liquid fuels through the gasification process, providing a more flexible and environmentally friendly use of this renewable resource. Biomass is a renewable energy form with many positive features. Biomass feedstocks are often inexpensive by-products of agriculture or forestry. They have low ash and sulphur content and do not add to the level of carbon dioxide in the atmosphere. Biomass resources are divided into two categories: wet biomass (molasses, starches and manures) and dry biomass (wood and agricultural materials and waste).

In general, biomass, which is a renewable energy source, is a huge energy resource that is poorly used in Kazakhstan. More detailed information on the energy properties of biomass is given in [24]. The simplest and most centuries-old method of biomass utilization is simple combustion. An alternative method to direct combustion of biomass, which allows eliminating the disadvantages and difficulties inherent in direct combustion, is its thermochemical conversion.

However, the formation of tar during the gasification process is one of the major problems to be dealt with, as tar reduces the efficiency of the conversion and condenses at lower temperatures, causing certain problems such as equipment clogging, complicated routine maintenance and difficult operation. Tar is usually a thick, dark liquid and consists of a spectrum of condensable hydrocarbons and oxygenated compounds, which are mainly aromatic and complex polyaromatic hydrocarbons (PAHs). However, some of the tar spectrum, having a low condensation temperature, in particular light hydrocarbons (C2-6), can actually avoid condensation and instead form tarry aerosols, which in turn degrades the quality of the exhaust gas and potentially makes it unsuitable for use in high-purity applications, other than direct combustion in boilers in hot form. It is a fact that the amount and composition of the resin obtained in the biomass gasification process depend on various factors such as the

type of biomass, the type of gasifier, the gasifying agent, and the operating temperature and pressure. There are more than 100 different compounds in the resin obtained from biomass.

In many cases, the simplest way to classify tars produced from biomass is to refer to tars as being of two types: “easy to break” tar and “hard to break” tar or “light tar” and “heavy tar” [25,26]. Tar is also used to represent all organic compounds with a molecular weight greater than benzene formed during biomass gasification. It should be noted that closed top dense bed gasification systems give higher tar yields than open top dense bed systems. Tests carried out in a joint India-Swiss project have shown that open top gasification systems produce the lowest tar output compared to other gasification systems [27]. This is due to the development of a front moving and propagating towards the upper end of the gasifier (due to the dual air inlet) from the top and nozzles. This ensures a longer residence time of the gases at high temperatures and the breakdown of the higher molecular weight fractions.

The integration of waste and renewable energy technologies contributes to environmental sustainability and energy independence. Pyrolysis methods and the use of phototrophic microorganisms support the creation of a sustainable energy infrastructure and the reduction of the carbon footprint. The development of biochemical approaches such as carbon capture and bioconversion reduce greenhouse gas emissions and transform waste into valuable resources. These innovations create scalable and cost-effective solutions that meet global environmental goals.

Conclusion. The introduction of waste recycling technologies strengthens Kazakhstan’s transition to sustainable development. Optimization of pyrolysis and biogas production reduce the carbon footprint and dependence on fossil fuels, increasing the efficiency of biomass use. Biochars are used to treat wastewater, promoting environmental sustainability.

The program increases the share of renewable energy, reduces risks and forms the basis for a “green economy”. The results include technology certification, patents and training of young professionals, which provides practical solutions to environmental and energy challenges.

Source of research funding. The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan within the framework of the research project “BR24992833 Developing chemical and biochemical solutions to reduce carbon footprints and restore ecosystems through waste recycling”

References

- 1 Schiffer H.W., WEC energy policy scenarios to 2050. *Energy Policy*, 2008. 36(7): p. 2464-2470.
- 2 Kashyap D.R., Dadhich K.S., and Sharma S.K. Biomethanation under psychrophilic conditions: a review. *Bioresource Technology*, 2003. 87(2): p. 147-153.
- 3 Iea I. International energy agency. key world energy statistics. *Key World Energy Statistics*, 2015.
- 4 Pachauri R. K. and A. Reisinger. IPCC fourth assessment report. IPCC, Geneva, 2007. 2007: p. 044023.
- 5 Chen L., et al. Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2022. 20(4): p. 2277-2310.
- 6 Oehlmann J., Schulte-Oehlmann U., Kloas W., Jagnytsch O., Lutz I., Kusk K.O., Wollenberger L., Santos E.M., Paull G.C., Van Look K.J.W., Tyler C.R. 2009. A critical analysis of the biological impacts of plasticizers on wildlife. *Philos. Trans. R. Soc. London* 364, 2047–2062. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0242>.
- 7 Pan D., Su F., Liu C., Guo Z., 2020. Research progress for plastic waste management and manufacture of value-added products. *Adv. Compos. Hybrid Mater.* 3, 443–461. <https://doi.org/10.1007/s42114-020-00190-0>.
- 8 Sims REH and Bassam N.E., Chapter 1 - Biomass and Resources, in *Bioenergy Options for a Cleaner Environment*, REH Sims, Editor. 2004, Elsevier: Oxford. p. 1-28.
- 9 Nowak J., et al., Composite structure of wood cells in petrified wood. *Materials Science and Engineering: C*, 2005. 25(2): p. 119-130.
- 10 Parawira W., et al., Energy production from agricultural residues: High methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, 2008. 32(1): p. 44-50.
- 11 Tyagi V. K. and S.-L. Lo, Sludge: A waste or renewable source for energy and resource recovery? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. 25: p. 708-728.
- 12 Cavinato C., et al., Thermophilic anaerobic co-digestion of cattle manure with agro-wastes and energy crops: Comparison of pilot and full scale experiences. *Bioresource Technology*, 2010. 101(2): p. 545-550.
- 13 Kacprzak A., Krzystek L., and Ledakowicz S., Co-digestion of agricultural and industrial wastes. 2010. 64(2): p. 127-131.
- 14 Callaghan F. J., et al., Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass and Bioenergy*, 2002. 22(1): p. 71-77.
- 15 Muradin M. and Foltynowicz Z. Potential for Producing Biogas from Agricultural Waste in Rural Plants in Poland. *Sustainability*, 2014. 6, 5065-5074 DOI: 10.3390/su6085065.
- 16 Xia A., Cheng J., Lin R., Lu H., Zhou J., Cen K. Comparison in dark hydrogen fermentation followed by photo hydrogen fermentation and methanogenesis

between protein and carbohydrate compositions in *Nannochloropsis oceanica* biomass. *Bioresour. Technol.* 2013, 138, 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.171>.

17 Khan S. Biodegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis* / S. Khan, S. Nadir, ZU Shah [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2017. – Vol. 225. – P. 469–480

18 Porous carbon materials based on carbon-containing raw materials of Kazakhstan. Monograph / Kazankapova M.K., Ermagambet B.T., Kasenov B.K., Nauryzbaeva A.T., Kasenova Zh.M., Kemelova B.A. - Nur-Sultan: LLP "Institute of Coal Chemistry and Technology", 2020. - 323 p.

19 Shuvalov Yu.V. Justification of rational technologies for obtaining fuel and energy raw materials based on solid combustible carbon-containing waste [Text] / Yu.V. Shuvalov, Yu.D. Tarasov, A.N. Nikulin // *Mining information and analytical bulletin*. - No. 8. - 2011. - P. 243-247.

20 Marreiro HMP, et al. Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. *Energies*, 2021. 14, DOI: 10.3390/en14248320.

21 Muazu R.I. and. Stegemann J.A. Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. *Fuel Processing Technology*, 2015. 133: p. 137-145.

22 Kaliyan N. and Morey R.V., Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, 2010. 101(3): p. 1082-1090.

23 Ververis C., et al., Cellulose, hemicelluloses, lignin and ash content of some organic materials and their suitability for use as paper pulp supplements. *Bioresource Technology*, 2007. 98(2): p. 296-301.

24 Pugach L.I., Serant F.A, Serant D.F. Alternative energy – renewable sources, use of biomass, thermochemical preparation, environmental safety / *Modern energy technologies. Proceedings of COTES. Issue 1.* – Novosibirsk. Publishing house of NSTU, 2006. – 347 p.

25 Correla J., Toledo J.M., Aznar M. P. Improved the modeling of the kinetics of the catalytic tar elimination in biomass gasification. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2002; 41:3351-6.

26 Pérez P., Aznar P.M., Caballero M.A., Gil J., Martín J.A., Corella J. Hot gas cleaning and upgrading with a calcined dolomite located downstream a biomass fluidized bed gasifier operating with steam-oxygen mixtures. *Energy & Fuels*. 1997; 11: 1194-203.

27 Dasappa S., Paul P., Mukunda H., Rajan N, Sridhar G. and Sridhar H., *Curr. Sci.*, 2004, 87, 908–916.

**Жұбанова А.А.¹, Нусипов Д.А.¹, Каменов Б.К.¹, Кожаметова М.Х.¹,
Аймагамбетов А.Т.¹, Арыстанбекұлы Б.¹, Сиангронг Л.²**

¹“Экология және биоресурстардың тұрақтылығы” ҒЗИ, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., Қазақстан

²Химия және химиялық инженерия колледжі, Сиань ғылым және технология университеті, Сиань қ., Қытай

КӨМІРТЕК ІЗДЕРІН АЗАЙТУ ЖӘНЕ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ҚАЙТА ӨНДЕУ АРҚЫЛЫ ЭКОЖҮЙЕНІ ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУ ҮШІН ХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ БИОХИМИЯЛЫҚ ШЕШІМДЕРДІ ӨЗІРЛЕУ

Түйіндеме. Мақалада көміртегі ізін азайтуға және экожүйелерді қалпына келтіруге бағытталған аграрлық және техногендік қалдықтарды қайта өңдеудің заманауи тәсілдеріне шолу берілген. Биокөмір, биогаз өндірісі және пиролиз процестерін оңтайландыру сияқты химиялық және биохимиялық шешімдерге назар аударылады. Өнеркәсіптік ағынды суларды адсорбциялық тазарту үшін ластануды азайтуға және ресурстарды ұтымды пайдалануға ықпал ететін биокөмірді қолдануға ерекше назар аударылады. Қазақстанның энергетикалық теңгеріміндегі жаңартылатын энергия үлесін арттыру және қазба отын түрлеріне тәуелділікті азайту перспективалары қарастырылуда. Зерттеу нәтижелерінен сертифицикатталған өнімді өзірлеуді, инновациялық технологияларды патенттеуді және оларды өндірістік процестерге енгізу күтіледі. Сондай-ақ, ғылыми-техникалық дамуға ықпал ететін жоғары білікті мамандарды даярлаудың және ғылыми мақалаларды жариялаудың маңыздылығы атап өтіледі. Мақала климаттың өзгеруінің жаһандық сын-қатерлеріне жауап беретін экологиялық тұрақты технологияларды ілгерілетуге қосқан үлесін көрсетеді.

Түйінді сөздер: микроорганизмдер, сорбция, пиролиз, биоконверсия, брикет, биоотын.

* * *

**Жұбанова А.А.¹, Нусипов Д.А.¹, Каменов Б.К.¹, Кожаметова М.Х.¹,
Аймагамбетов А.Т.¹, Арыстанбекұлы Б.¹, Сиангронг Л.²**

¹НИИ «Экология и устойчивость биоресурсов», КазНУ им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Колледж химии и химической инженерии, Сианьский университет науки и технологии, г. Сиань, Китай

РАЗРАБОТКА ХИМИЧЕСКИХ И БИОХИМИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ ЧЕРЕЗ ПЕРЕРАБОТКУ ОТХОДОВ

Аннотация. В статье представлен обзор современных подходов к переработке аграрных и техногенных отходов, направленных на сокращение углеродного следа и восстановление экосистем. Основное внимание уделено

химическим и биохимическим решениям, таким как производство биоугля, биогаза и оптимизация процессов пиролиза. Особый акцент сделан на использовании биоугля для адсорбционной очистки промышленных стоков, что способствует снижению загрязнений и рациональному использованию ресурсов. Рассматриваются перспективы повышения доли возобновляемой энергии в энергетическом балансе Казахстана и уменьшения зависимости от ископаемых видов топлива. Ожидаемые результаты исследований включают разработку сертифицированной продукции, патентование инновационных технологий и их внедрение в производственные процессы. Также подчеркивается значимость подготовки высококвалифицированных специалистов и публикации научных статей, что способствует научно-техническому развитию. Статья демонстрирует вклад в продвижение экологически устойчивых технологий, отвечающих глобальным вызовам изменения климата.

Ключевые слова: микроорганизмы, сорбция, пиролиз, биоконверсия, брикет, биотопливо.

Information about the authors

Zhubanova Azhar Akhmetovna – professor, SRI “Ecology and Sustainability of Bioresources”, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty c., Kazakhstan, azhar_1941@mail.ru

Contribution to the work: drawing up the original idea of the article

Nussipov Damir Asanovich – researcher at the Research Institute for Sustainability of Ecology and Bioresources, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty c., Kazakhstan, nussipov.damir@mail.com

Contribution to the work: development of a low-waste technology for the use of microalgae biomass

Kamenov Bekzat Kelbetuly – researcher at the Research Institute for “Sustainability of Ecology and Bioresources”, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty c., Kazakhstan, kamenov01@bk.ru

Contribution to the work: research on the selection of resistant phototrophic microorganisms

Kozhakhmetova Marzhan Khalidollaevna – researcher at the Research Institute of Sustainability of Ecology and Bioresources, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty c., Kazakhstan, marzhanur.7@mail.ru

Contribution to the work: research of the consortium's ability to absorb and accumulate metals and organic substances

Aimagambetov A.T. – research Assistant of Research Institute «Ecology and Bioresources Sustainability», Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty c., Kazakhstan, anrayalan@gmail.com

Contribution to the work: assistance in drawing up an article plan

Arystanbekuly Birzhan - research Assistant of Research Institute «Ecology and Bioresources Sustainability», Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty c., Kazakhstan, birzhanarystanbek@gmail.com

Contribution to the work: assistance in drawing up an article plan

Xiangrong Liu - Second-Level Professor, PhD Supervisor, Director of Coal Biotransformation Laboratory at Xi'an University of Science and Technology, Xi'an c., China, liuxiangrongxk@163.com

Contribution to the work: distribution and regulation writing an article

Авторлар туралы мәліметтер

Жұбанова Ажар Ахметқызы – профессор, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., Қазақстан, azhar_1941@mail.ru

Жұмысқа қосқан үлесі: мақаланың бастапқы идеясын құрастыру

Нусипов Дамир Асанович – «Экология және биоресурстардың тұрақтылығы» ҒЗИ ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., Қазақстан, nussipov.damir@mail.com

Жұмысқа қосқан үлесі: микробалдырлар биомассасын пайдаланудың аз қалдықты технологиясын әзірлеу

Каменов Бекзат Келбетұлы – «Экология және биоресурстардың тұрақтылығы» ҒЗИ ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., Қазақстан, kamenov01@bk.ru

Жұмысқа қосқан үлесі: тұрақты фототрофты микроорганизмдерді іріктеу бойынша зерттеу

Кожаметова Маржан Халидоллаевна – «Экология және биоресурстардың тұрақтылығы» ҒЗИ ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., Қазақстан, marzhanur.7@mail.ru

Жұмысқа қосқан үлесі: консорциумның металдар мен органикалық заттарды сіңіру және сақтау қабілетін зерттеу

Аймагамбетов А.Т. – «Экология және биоресурстардың тұрақтылығы» ҒЗИ кіші ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., Қазақстан, anrayalan@gmail.com

Жұмысқа қосқан үлесі: мақала жоспарын құруға көмектесу

Арыстанбекұлы Біржан – «Экология және биоресурстардың тұрақтылығы» ҒЗИ кіші ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., Қазақстан, birzhanarystanbek@gmail.com

Жұмысқа қосқан үлесі: мақала жоспарын құруға көмектесу

Сиангронг Лю – Екінші Деңгейлі Профессор, Phd Ғылыми Жетекшісі, Сиань

Ғылым Және Технологиялар Университетінің Көмір Биотрансформациясы
Зертханасының Директоры, Сиань қ., Қытай, liuxiangrongxk@163.com

Жұмысқа қосқан үлесі: мақала жазу жоспарын бөлу және жазу

Сведения об авторах

Жубанова Ажар Ахметқызы – профессор, НИИ «Экология и устойчивость биоресурсов», КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы г., Казахстан, azhar_1941@mail.ru

Вклад в работу: составление исходной идеи статьи

Нусипов Дамир Асанович – научный сотрудник НИИ «Устойчивости экологии и биоресурсов», КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы г., Казахстан, nussipov.damir@mail.com

Вклад в работу: разработка малоотходной технологии использования биомассы микроводорослей

Каменов Бекзат Келбетұлы – научный сотрудник НИИ «Устойчивости экологии и биоресурсов», КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы г., Казахстан, katenov01@bk.ru

Вклад в работу: исследование по отбору устойчивых фототрофных микроорганизмов

Кожаметова Маржан Халидоллаевна – научный сотрудник НИИ «Устойчивости экологии и биоресурсов», КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы г., Казахстан, marzhanur.7@mail.ru

Вклад в работу: исследование способности консорциума поглощать и накапливать металлы и органические вещества

Аймагамбетов А.Т. – научный сотрудник Научно-исследовательского института «Экология и устойчивое использование биоресурсов», КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы г., Казахстан, anrayalan@gmail.com

Вклад в работу: помощь в составлении плана статьи

Арыстанбекулы Биржан – научный сотрудник Научно-исследовательского института «Экология и устойчивое использование биоресурсов», КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы г., Казахстан, birzhanarystanbek@gmail.com

Вклад в работу: помощь в составлении плана статьи

Сиангронг Лю – профессор второго уровня, научный руководитель PhD, директор лаборатории биотрансформации угля Сианьского университета науки и технологий, г. Сиань, Китай, liuxiangrongxk@163.com

Вклад в работу: разделение и регулирование написания статьи

МАҚАЛАНЫҢ АУДАРМАСЫ / ПЕРЕВОД СТАТЬИ

**Жубанова А.А.¹, Нусипов Д.А.¹, Каменов Б.К.¹, Кожахметова М.Х.¹,
Аймагамбетов А.Т.¹, Арыстанбекулы Б.¹, Сиангронг Л.²**

¹НИИ «Экология и устойчивость биоресурсов», КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы г., Казахстан

²Колледж химии и химической инженерии, Сианьский университет науки и технологии, г. Сиань, Китай

РАЗРАБОТКА ХИМИЧЕСКИХ И БИОХИМИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ ЧЕРЕЗ ПЕРЕРАБОТКУ ОТХОДОВ

Аннотация. В статье представлен обзор современных подходов к переработке аграрных и техногенных отходов, направленных на сокращение углеродного следа и восстановление экосистем. Основное внимание уделено химическим и биохимическим решениям, таким как производство биоугля, биогаза и оптимизация процессов пиролиза. Особый акцент сделан на использовании биоугля для адсорбционной очистки промышленных стоков, что способствует снижению загрязнений и рациональному использованию ресурсов. Рассматриваются перспективы повышения доли возобновляемой энергии в энергетическом балансе Казахстана и уменьшения зависимости от ископаемых видов топлива. Ожидаемые результаты исследований включают разработку сертифицированной продукции, патентование инновационных технологий и их внедрение в производственные процессы. Также подчеркивается значимость подготовки высококвалифицированных специалистов и публикации научных статей, что способствует научно-техническому развитию. Статья демонстрирует вклад в продвижение экологически устойчивых технологий, отвечающих глобальным вызовам изменения климата.

Ключевые слова: микроорганизмы, сорбция, пиролиз, биоконверсия, брикет, биотопливо.

Введение. Программа направлена на разработку инновационных технологий переработки отходов для снижения углеродного следа и восстановления экосистем. Устойчивое управление отходами становится особенно актуальным в условиях климатических изменений и нарастающего экологического кризиса. Основное внимание уделено переработке промышленных и сельскохозяйственных отходов в полезные продукты, включая биотопливо, энергию и материалы,

что способствует снижению зависимости от ископаемых источников и поддерживает «зеленую экономику». Программа решает задачи разработки перспективных методов пиролиза, использования биохимических процессов для получения энергии и очистки загрязнённых экосистем. Эти технологии способны не только улучшить экологическую обстановку, но и стать основой для международного внедрения устойчивых решений. Партнёрство научных и промышленных организаций усиливает потенциал программы, обеспечивая её интеграцию в национальную экономику. Совместные исследования и разработка прикладных технологий позволяют достичь экологических и энергетических целей, минимизируя воздействие на окружающую среду и создавая базу для масштабирования инновационных решений на глобальном уровне.

Методы и результаты исследования. Перманентно возрастающее использование традиционных источников энергии и как следствие этого увеличивающееся загрязнение окружающей среды ставят перед человечеством вызов к поиску альтернативных источников энергии. К тому же, мировое население растёт с тревожной скоростью; согласно прогнозам ООН, к 2050 году численность населения планеты достигнет около десяти миллиардов человек. Это неизбежно приведет к значительному увеличению спроса на энергию, примерно на 24 миллиарда тонн угольного эквивалента ежегодно [1]. Учитывая рост экологических проблем и цен на энергоресурсы, разработка и внедрение альтернативных источников энергии становятся критически важным направлением в энергетике будущего. Особенно велико внимание к производству биотоплива, включая этанол, биодизель и биогаз, из возобновляемых источников энергии [2]. Международное энергетическое агентство (МЭА) отмечает, что более 80% мировых поставок первичной энергии приходится на ископаемое топливо, основной источник антропогенных выбросов углекислого газа, который является основным фактором глобального потепления [3]. Поэтому снижение мировых выбросов CO₂ по меньшей мере на 50% по сравнению с уровнем 2000 года к 2050 году, как указывает Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), является обязательным условием для устойчивого будущего [4]. Электроэнергетический сектор, который производит около 42% всех выбросов CO₂, активно исследует технологические решения, способные сократить выбросы [5].

Так же, как и неизбежные проблемы в сфере энергетики, загрязне-

ние пластиком, которое характеризуется его широким распространением и продолжительным временем разложения, представляет собой серьезную угрозу экологической устойчивости и здоровью человека. Пластик, обладающий такими ценными свойствами, как легкость, прочность, хорошая жесткость, универсальные возможности для изготовления, хорошая теплоизоляция, низкая проводимость электричества/тепла и устойчивость к коррозии [6,7], широко используется в различных секторах. Однако его влияние на окружающую среду катастрофично. По оценкам, около 4% мировой добычи нефти и газа идет на производство пластика, что также увеличивает объемы выбросов вредных веществ [7]. Ежегодное глобальное производство пластика превышает 359 миллионов тонн, и хотя он предлагает множество преимуществ, он также создает серьезные экологические проблемы. Микрочастицы пластика распространяются в атмосфере, водоемах и почве, вызывая негативные последствия для здоровья человека и животных, такие как сердечно-сосудистые заболевания, хронические болезни почек, другие заболевания [6,7].

Проблемы утилизации аграрных и техногенных отходов остро стоят не только перед Казахстаном, но и перед множеством других стран. Во всем мире накопление отходов от сельского хозяйства и промышленной деятельности вызывает серьезные экологические проблемы, включая загрязнение воды, почвы и воздуха, а также угрозу биоразнообразию. В аграрном секторе огромные объемы сельскохозяйственных отходов, таких как стебли кукурузы, пшеничная солома и другие растительные остатки, часто сжигаются или захораниваются, что приводит к выделению в атмосферу метана и углекислого газа. Эти газы являются значимыми факторами глобального потепления.

Промышленные отходы, включая угольную пыль и металлургические шлаки, также представляют собой значительную проблему. Без должной переработки эти материалы могут оказывать токсическое воздействие на окружающую среду, загрязняя земельные и водные ресурсы тяжелыми металлами и другими вредными веществами. Поэтому поиск эффективных методов утилизации таких отходов становится приоритетным направлением в стратегиях устойчивого развития. Развитие и внедрение технологий, которые могут превращать аграрные и техногенные отходы в полезные ресурсы, такие как биотопливо, строительные материалы или даже источники возобновляемой энергии, является ключевым элементом для сокращения экологической нагрузки и поддержания экологического баланса.

Программа выделяется инновационным подходом к переработке аграрных и техногенных отходов, преобразуя их в полезные продукты: биотопливо, строительные материалы и энергию. Эти технологии значительно снижают объемы отходов и углеродный след, поддерживая экологически чистые и устойчивые решения. Особое внимание уделено разработке экономически эффективных технологий, соответствующих глобальным целям борьбы с изменением климата и перехода к «зеленой экономике». Программа имеет значение не только для локальных экологических задач, но и для достижения энергетической независимости и устойчивого развития на международном уровне. Для решения экологических проблем, разработка эффективной технологии получения биогаза из отходов сельскохозяйственной промышленности представляет собой ключевое направление. Этот процесс позволяет не только сократить объемы аграрных отходов, но и превратить их в ценный источник возобновляемой энергии, тем самым способствуя устойчивому развитию и снижению углеродных эмиссий. Среди перспективных источников биоэнергии сельскохозяйственная лигноцеллюлозная биомасса является основным источником разнообразных органических биопродуктов (органических кислот, пищевых добавок, ферментов и т. д.), а также, это хорошее биотопливо из-за ее биохимического состава, состоящего из сахаров и других ценных компонентов. Преобразование сельскохозяйственных отходов, а именно пшеничной соломы, стеблей кукурузы, рисовой соломы, жмыха сахарной свеклы и т. д. в биогаз может служить перспективной заменой для решения основной части энергетических проблем. Лигноцеллюлозная биомасса представляет собой неисчерпаемый и обильный возобновляемый ресурс, который постоянно пополняется в процессе фотосинтеза. В его состав входит значительная часть отходов сельскохозяйственных культур, энергетических культур, навоза животных, твердых бытовых отходов (ТБО), и остатки леса [8]. Эти экономичные возобновляемые источники энергии доступны в большом количестве. В свою очередь, их избыточное накопление может приводить к экологическим проблемам, и, если их не использовать и некорректно утилизировать, то это приведет к существенной потере ценных биоресурсов. Вышеперечисленное обуславливает интерес к процессам конверсии и использования сельскохозяйственной лигноцеллюлозной биомассы для производства энергии/электроэнергии посредством прямых и косвенных путей конверсии. Общее потребление энергии во всем мире в год составляет четверть

скорости синтеза целлюлозы растениями и водорослями (8,5х10¹⁰ т/годовой эквивалент) [9]. Прямое сжигание для производства тепла и электроэнергии является классическим способом использования биомассы для получения энергии [10]. Тем не менее, процесс анаэробного сбраживания или биометанизация представляет собой эффективный способ превратить огромную биомассу, такую как навоз животных, лигноцеллюлозные сельскохозяйственные остатки, отходы лесного хозяйства, коммунальные и пищевые отходы и т. д., в биогаз под действием разнообразных групп микробных популяций в анаэробных условиях [11].

Однако анаэробное сбраживание различных органических биомасс является относительно чувствительным процессом, который в основном зависит от соединений субстратов, которые могут быть преобразованы в биогаз: химический состав и биоразлагаемость биомассы являются ключевыми факторами для производства биогаза. Множество исследований направлено на процесс анаэробного сбраживания с использованием моносубстратов. Однако, в последние годы активно проводятся исследования по производству биогаза с помощью анаэробного совместного брожения (АСБ) сельскохозяйственных отходов и навоза. Например, Cavinato et al. провели совместное брожение навоза крупного рогатого скота, агроотходов и энергетических культур [12]; Kasprzak и др. проанализировали совместное брожение сельскохозяйственных отходов и ТБО [13]. Callaghan et al. оптимизировали процесс совместного сбраживания путем использования трех видов сырья: крупного рогатого скота, куриного помета и фруктово-овощных отходов [14]. Muradin and Foltynowicz провели экономический анализ биогазовой установки, которая перерабатывала девять видов сырья (т.е. кукурузный силос, картофельную пульпу, отработанные отходы виноделия, фруктовые и овощные выжимки, зерновые, отходы растительных тканей, муниципальный ил и соевое масло) [15]. АСБ представляет собой экономически рентабельный процесс и может обеспечить эффективный синергизм в реакторе. Резко возросшее количество публикаций по тематике АСБ в последние десятилетия свидетельствуют о том, что процессу анаэробного сбраживания уделяется все большее внимание и увеличение производства биогаза является одной из актуальнейших тем для исследований.

Важным направлением исследований также является использование фототрофных микроорганизмов, таких как микроводоросли, которые могут использоваться для улавливания углекислого газа и

производства биотоплива. Эти микроорганизмы способны поглощать значительные объемы CO_2 , что делает их ценным инструментом в борьбе с глобальным потеплением. Они также могут использоваться для очистки сточных вод, удаляя токсичные вещества и питательные элементы, предотвращая эвтрофикацию водоемов и способствуя производству экологически чистой энергии [16]. Исследовательская группа имеет достаточный опыт работы в области биотехнологии фототрофных микроорганизмов, в том числе в области исследований их потенциала в очистке водных экосистем, загрязненных различными токсикантами, а также научной группой проводятся исследования по поиску и выделению штаммов микроводорослей, являющихся перспективными продуцентами, либо сырьем для производства экологически чистых видов биотоплива. Коллектив имеет большой задел в области исследований микроводорослей, их морфологических и физиолого-биохимических особенностей и обладает большим опытом по культивированию микроводорослей, получению на их основе различных биологически активных веществ и БАДов. Исследовательской группой получены патенты и опубликованы статьи в высокорейтинговых международных журналах и учебные пособия, что является подтверждением имеющегося достаточного опыта для реализации предлагаемой программы. Также, в лаборатории биотехнологии имеется коллекция фототрофных микроорганизмов, включающая более 50 чистых штаммов микроводорослей и цианобактерий, 20 штаммов из которых получены и депонированы в РКМ.

Обосновывая научную новизну и иновационность предлагаемой программы необходимо отметить, что одна из задач программы направлена на разработку инновационной малоотходной технологии использования биомассы микроводорослей в процессах очистки стоков и дымовых газов с параллельным получением биомассы как сырья для производства биотоплива. При этом планируется проведение исследований по отбору устойчивых фототрофных микроорганизмов для формирования консорциума, комплексное исследование способности консорциума использовать CO_2 дымовых газов, а также поглощать и накапливать металлы и органические вещества. Учитывая тот факт, что фототрофные организмы — самые быстрорастущие и высокоэнергетические культуры, целесообразно проведение анализа энергетического потенциала биомассы, полученной попутно при очистке отходов производства.

Предлагаемая программа не имеет подобных аналогов в Казах-

стане. В Казахстане ограниченное количество исследований посвящено таким биотехнологическим областям использования микроводорослей, как их массовое культивирование для получения кормовых добавок и применение в очистке сточных вод от загрязнителей с дальнейшим применением этой биомассы в производстве биодизеля. Существующее значительное количество исследований, посвященных изучению механизмов резистентности растений к ТМ, больше всего касается наземных видов, устойчивость водных фототрофных микроорганизмов к металлам исследовано ограниченно, вопреки их широкому использованию в системах очистки сточных вод.

Отметим, что предлагаемая программа имеет потенциал стать важным элементом глобальных усилий по обеспечению устойчивости природы и сохранению ее ресурсов, поэтому подводим Ваше внимание к значимости его развития в нашей стране для восстановления биоразнообразия в водных экосистемах. Проблемы загрязнения бытовых и промышленных сточных вод из-за антропогенного воздействия, загрязнения атмосферы, изменения климатических условий вследствие избыточного выделения углекислого газа в атмосферу, являются актуальными и распространенными в масштабах всей планеты. Но несмотря на принимаемые меры и имеющиеся текущие методы, требуется поиск новаторских подходов и зеленых технологий для более эффективной очистки водных ресурсов от различного рода загрязнителей и перехода на экологически чистые виды топлива. Несмотря на ряд безусловных преимуществ, современные физико-химические методы очистки объектов окружающей среды, обременены значительными недостатками, такими как сложная регуляция режима при использовании коагулянтов и флокулянтов, низкая эффективность, предварительные этапы очистки, образование высокотоксичных элюатов при сорбции, требующих дополнительной деструкции, и другие. Предполагаемые результаты программы могут послужить основой для разработки альтернативного метода восстановления объектов окружающей среды и перехода на инновационные технологии, характеризующиеся низким углеродным следом. Использование консорциума фототрофных микроорганизмов обладает преимуществами, такими как рентабельность, извлечения большого количества ксенабиотиков за счет оптимального соотношения площади обрабатываемой поверхности к объему, а также уменьшенное образование химических и биологических осадков, подлежащих изъятию.

В области управления пластиковыми и техногенными отходами

выделяются ключевые методы их переработки, направленные на минимизацию экологического воздействия. Существует четыре основных направления переработки твердых пластиковых отходов, а именно: резкструзия в качестве первичной обработки, механическая обработка в качестве вторичной меры, химическая обработка в качестве третичной меры и рекуперация энергии в качестве четвертичной меры. Пиролизное масло имеет свойства, близкие к чистому топливу, и, следовательно, является заменителем свежего ископаемого топлива для производства электроэнергии, транспорта и других применений. Исследование показало, что пиролиз пластиковых отходов предлагает альтернативный способ утилизации пластиковых отходов и альтернативный источник ископаемого топлива для снижения общего спроса на первичную нефть. Посредством пиролиза пластика пластиковые отходы термически превращаются в топливо путем разложения длинноцепочечных полимеров на небольшие сложные молекулы в отсутствие кислорода, что делает этот процесс технически и экономически целесообразным для переработки пластиковых отходов. Преимущество этого процесса заключается в том, что не требуется предварительная сортировка, а пластиковые отходы можно подавать непосредственно без предварительной обработки перед процессом. Продуктами пиролиза пластмасс являются пиролизное масло, богатый углеводородами газ с теплотворной способностью 25–45 МДж/кг, что делает его идеальным для регенерации технологической энергии. Следовательно, пиролизный газ можно возвращать в процесс для извлечения энергии для технологического нагрева, что существенно снижает зависимость от внешних источников нагрева [17].

Проблемы утилизации аграрных отходов являются актуальными не только для Казахстана, но и для многих стран мира, сталкивающихся с необходимостью устойчивого управления отходами. В Казахстане, например, практически не используются такие ценные ресурсы, как рисовая шелуха и куриный помет, хотя эти отходы могут быть переработаны в адсорбенты, используемые для очистки различных типов вод: производственных, питьевых, сточных и промышленных. Учитывая важность проблемы для охраны здоровья населения Казахстана в ТОО «Институт химии угля и технологии» получены предварительные образцы углеродных адсорбентов на основе рисовой шелухи, соломы, жмыха, куриного помета, пластиковых отходов [18], а также комплексное удобрение из окисленного угля Казахстана. Адсорбенты прошли предварительные лабораторные испытания

по очистке питьевых и сточных канализационных вод, взятых в ГКП «Астана су арнасы» (г. Астана).

Еще одним направлением для снижения выбросов является брикетирование техногенных отходов. Брикетирование углеродсодержащих отходов, включая угольную мелочь и биомассу, представляет собой эффективный способ переработки, превращая их в компактные топливные брикеты с высокой энергетической ценностью, которые удобны в использовании и транспортировке. Различают два способа брикетирования углей: без связующих веществ, при повышенном давлении прессования (выше 80 МПа), и со связующим веществом, при малых давлениях прессования (15-25 МПа). По первому способу брикетируются молодые (мягкие) бурые угли и торф, по второму – мелочь каменных и старых (твердых) бурых углей, антрацитовый штыб, полукоксовая и коксовая мелочь [19].

В течение многих лет в производстве брикетов использовались различные связующие. Их можно классифицировать по нескольким категориям – в зависимости от температуры, при которой формируются брикеты, или от температуры первичной термообработки брикетов или же температуры окончательной обработки. Стоимость связующих веществ, обеспечивающих низкотемпературное протекание процесса брикетирования, намного выше, чем цена на связующие, предусматривающие высокотемпературную обработку, но при низкотемпературном брикетировании уменьшаются капитальные затраты и сложность установки. Высокотемпературные процессы проходят при температурах от 450 до 850 °С, в результате чего происходит спекание частиц в брикет. Низкотемпературные процессы происходят при температурах до 250°С.

Одним из наиболее перспективных направлений в настоящее время считается брикетирование биомассы. Существуют комбинированные технологии, совмещающие переработку твердых горючих ископаемых и биомассы. Введение в брикет пористых возобновляемых углеродсодержащих отходов не только решает экологические проблемы и удешевляет стоимость товарного продукта, но и способствует улучшению кинетики сгорания.

Процесс прессования органических отходов в топливные брикеты имеет множество преимуществ, в том числе легкость транспортировки и хранения, более последовательную подачу в конверсионное оборудование и более высокую эффективность термического преобразования по сравнению с рыхлой биомассой. Плотность и прочность то-

плавных брикетов имеют большое значение, поскольку брикеты низкого качества могут распадаться и рассыпаться обратно на исходные материалы при переработке или хранении, что в свою очередь может нивелировать преимущества брикетирования [20]. Добавление связующих компонентов или агентов к рыхлым остаткам биомассы перед их уплотнением рассматривается как один из способов устранения таких недостатков и снижения производственных затрат [21, 22]. Однако из-за негативных последствий использования некоторых связующих как при уплотнении, так и при сжигании брикетов, необходима разработка более эффективных и устойчивых связующих для брикетирования органических отходов.

Микроводоросли потенциально могут быть использованы в качестве связующего материала благодаря высокому содержанию белка и значительного содержания лигнина. В присутствии влаги остатки микроводорослей выделяют вещество, связывающее белок, которое действует как клей между частицами рыхлой биомассы, образуя прочные мостики и заполняя пустоты [23]. Использование микроводорослей в качестве связующего компонента для брикетов приобрело большой интерес и стало предметом масштабных исследований за последнее время, поскольку данный вид био и энергоресурса может улавливать углерод для роста, выращиваться с использованием сточных вод, а также, может иметь высокое содержание липидов. Обеспечение эффективного извлечения энергии и углерода из остатков микроводорослей имеет важное значение для обеспечения экологической и экономической устойчивости микроводорослевого биотоплива.

Газификация биомассы является ключевым методом преобразования твердого топлива в более удобные для использования формы энергии. Биомасса, подобно углю, традиционно используется в твердом состоянии, что может быть не так удобно, как использование газообразного или жидкого топлива. Однако современные технологии позволяют эффективно преобразовывать биомассу в газ или жидкое топливо через процесс газификации, обеспечивая тем самым более гибкое и экологичное использование этого возобновляемого ресурса. Биомасса – это возобновляемая энергетическая форма с множеством позитивных особенностей. Сырье биомассы часто является недорогим побочным продуктом сельского хозяйства или лесоводства. Оно имеет низкое содержание золы и серы и не увеличивает уровень углекислого газа в атмосфере. Ресурсы биомассы делятся на две ка-

тегии: влажная биомасса (меласса, крахмалы и навозы) и сухая биомасса (древесные и сельскохозяйственные материалы и отходы).

В целом, биомасса, являющаяся возобновляемым источником энергии – это огромный энергетический ресурс, слабо использованный в Казахстане. Более подробные сведения об энергетических свойствах биомассы приведены в [24]. Наиболее простым и веками используемым способом утилизации биомассы является простое сжигание. Альтернативным способом прямому сжиганию биомассы, позволяющему исключить присущие прямому способу сжигания недостатки и трудности, является её термохимическая конверсия.

Однако в процессе газификации происходит образование смолы, что является одной из серьезных проблем, с которыми приходится иметь дело, так как смоласнижает эффективность преобразования конденсируясь при понижении температуры приводит к определённым неприятностям, такими как засорение оборудования, усложнению регламентного обслуживания и затрудняет эксплуатацию. Смола обычно представляет собой густую, темного цвета жидкость и состоит из спектра конденсируемых углеводородов и кислородосодержащих соединений, которые в основном являются ароматическими и сложными полиароматическими углеводородами (ПАУ). При этом часть спектра смол, имея низкую температуру конденсации, в частности, легкие углеводороды (C2-6) могут фактически избегать конденсации и вместо этого образовывать смолистые аэрозоли, что, в свою очередь, ухудшает качество выходящего газа и потенциально делает его непригодным для использования в высокочистых приложениях, помимо прямого сжигания их в котлах в горячем виде. Является фактом, что количество и состав смолы, получаемой в процессе газификации биомассы, зависят от различных факторов, таких как тип биомассы, тип газогенератора, газифицирующий агент, а также рабочая температура и давление. В смоле, полученной из биомассы, существует более 100 различных соединений.

Во многих случаях простейшим способом классификации смолы, получаемой из биомассы, является упоминание гудронов по двум типам: смола «легко разрушаемая» и «смола трудно разрушаемая» или «легкая смола» и «тяжелая смола» [25,26]. Смола также используется для представления всех органических веществ с молекулярной массой, большей, чем у бензола, образующегося при газификации биомассы. Следует заметить, что система газификации плотного слоя с закрытой верхней частью дают более высокий выход смолы

по сравнению с системой плотного слоя с открытой верхней частью. Испытания, выполненные в совместном проекте Индии и Швейцарии, показали, что системы газификации с открытым верхом производят самое низкое количество смол по сравнению с другими системами газификации [27]. Это происходит за счёт появления фронтадвигающегося и распространяющегося к верхнему концу газификатора (из-за двойного входа воздуха) от верхней части и сопел. Это обеспечивает более высокий срок пребывания газов при высоких температурах и распада фракций с более высоким молекулярным весом.

Интеграция технологий переработки отходов и возобновляемых источников энергии способствует экологической безопасности и энергетической независимости. Методы пиролиза и использование фототрофных микроорганизмов поддерживают создание устойчивой энергетической инфраструктуры и сокращение углеродного следа. Разработка биохимических подходов, таких как улавливание углерода и биоконверсия, позволяет уменьшить выбросы парниковых газов и преобразовать отходы в ценные ресурсы. Эти инновации создают масштабируемые и экономически эффективные решения, соответствующие глобальным экологическим целям.

Вывод. Внедрение технологий переработки отходов укрепляет переход Казахстана к устойчивому развитию. Оптимизация пиролиза и производство биогаза снижают углеродный след и зависимость от ископаемого топлива, повышая эффективность использования биомассы. Биоугли применяются для очистки стоков, способствуя экологической устойчивости. Программа увеличивает долю возобновляемой энергии, снижает риски и формирует основу для «зеленой экономики». Результаты включают сертификацию технологий, патенты и подготовку молодых специалистов, что обеспечивает практические решения для экологических и энергетических вызовов.

Источник финансирования исследований. Работа выполнена при поддержке МОН РК в рамках научно-исследовательского проекта «BR24992833 Разработка химических и биохимических решений для сокращения углеродного следа и восстановления экосистем через переработку отходов»

Список литературы / References

- 1 *Schiffer H.W.*, WEC energy policy scenarios to 2050. *Energy Policy*, 2008. 36(7): p. 2464-2470.
- 2 *Kashyap D.R., Dadhich K.S., and Sharma S.K.*, Biomethanation under psychrophilic conditions: a review. *Bioresource Technology*, 2003. 87(2): p. 147-153.
- 3 *Iea I.*, International energy agency. key world energy statistics. *Key World Energy Statistics*, 2015.
- 4 *Pachauri R. K. and A. Reisinger*, IPCC fourth assessment report. IPCC, Geneva, 2007. 2007: p. 044023.
- 5 *Chen L., et al.*, Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2022. 20(4): p. 2277-2310.
- 6 *Oehlmann J., Schulte-Oehlmann U., Kloas W., Jagnytisch O., Lutz I., Kusk K.O., Wollenberger L., Santos E.M., Paull G.C., Van Look K.J.W., Tyler C.R.*, 2009. A critical analysis of the biological impacts of plasticizers on wildlife. *Philos. Trans. R. Soc. London* 364, 2047–2062. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0242>.
- 7 *Pan D., Su F., Liu C., Guo Z.*, 2020. Research progress for plastic waste management and manufacture of value-added products. *Adv. Compos. Hybrid Mater.* 3, 443–461. <https://doi.org/10.1007/s42114-020-00190-0>.
- 8 *Sims REH and Bassam N.E.*, Chapter 1 - Biomass and Resources, in *Bioenergy Options for a Cleaner Environment*, REH Sims, Editor. 2004, Elsevier: Oxford. p. 1-28.
- 9 *Nowak J., et al.*, Composite structure of wood cells in petrified wood. *Materials Science and Engineering: C*, 2005. 25(2): p. 119-130.
- 10 *Parawira W., et al.*, Energy production from agricultural residues: High methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, 2008. 32(1): p. 44-50.
- 11 *Tyagi V. K. and S.-L. Lo*, Sludge: A waste or renewable source for energy and resource recovery? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. 25: p. 708-728.
- 12 *Cavinato C., et al.*, Thermophilic anaerobic co-digestion of cattle manure with agro-wastes and energy crops: Comparison of pilot and full scale experiences. *Bioresource Technology*, 2010. 101(2): p. 545-550.
- 13 *Kacprzak A., Krzystek L., and Ledakowicz S.*, Co-digestion of agricultural and industrial wastes. 2010. 64(2): p. 127-131.
- 14 *Callaghan F. J., et al.*, Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass and Bioenergy*, 2002. 22(1): p. 71-77.
- 15 *Muradin M. and Foltynowicz Z.* Potential for Producing Biogas from Agricultural Waste in Rural Plants in Poland. *Sustainability*, 2014. 6, 5065-5074 DOI: 10.3390/su6085065.
- 16 *Xia A., Cheng J., Lin R., Lu H., Zhou J., Cen K.* Comparison in dark hydrogen fermentation followed by photo hydrogen fermentation and methanogenesis

between protein and carbohydrate compositions in *Nannochloropsis oceanica* biomass. *Bioresour. Technol.* 2013, 138, 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.171>.

17 Khan S. Biodegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis* / S. Khan, S. Nadir, ZU Shah [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2017. – Vol. 225. – P. 469–480

18 Пористо-углеродные материалы на основе углеродсодержащего сырья Казахстана. Монография / Казанкапова М.К., Ермағамбет Б.Т., Касенов Б.К., Наурызбаева А.Т., Касенова Ж.М., Кемелова Б.А. – Нур-Султан: ТОО «Институт химии угля и технологии», 2020. – 323 с.

19 Шувалов Ю.В. Обоснование рациональных технологий получения топливно-энергетического сырья на основе твердых горючих углеродсодержащих отходов [Текст] / Ю.В. Шувалов, Ю.Д. Тарасов, А.Н. Никулин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – № 8. – 2011. – С. 243-247.

20 Marreiro H.M.P., et al. Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. *Energies*, 2021. 14, DOI: 10.3390/en14248320.

21 Muazu R.I. and Stegemann J.A., Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. *Fuel Processing Technology*, 2015. 133: p. 137-145.

22 Kaliyan N. and Morey R.V., Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, 2010. 101(3): p. 1082-1090.

23 Ververis C., et al., Cellulose, hemicelluloses, lignin and ash content of some organic materials and their suitability for use as paper pulp supplements. *Bioresource Technology*, 2007. 98(2): p. 296-301.

24. Пугач Л.И., Серант Ф.А., Серант Д.Ф. Нетрадиционная энергетика – возобновляемые источники, использование биомассы, термохимическая подготовка, экологическая безопасность / Современные энерготехнологии. Труды КОТЭС. Выпуск 1. – Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2006. – 347 с.

25 Correla J., Toledo J. M., Aznar M. P. Improved the modeling of the kinetics of the catalytic tar elimination in biomass gasification. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2002; 41:3351-6.

26 Perez P., Aznar P.M., Caballero M.A., Gil J., Martin J.A., Corella J. Hot gas cleaning and upgrading with a calcined dolomite located downstream a biomass fluidized bed gasifier operating with steam-oxygen mixtures. *Energy & Fuels*. 1997; 11: 1194-203.

27 Dasappa S., Paul P., Mukunda H., Rajan N, Sridhar G. and Sridhar H., *Curr. Sci.*, 2004, 87, 908–916.