

References

1. Voznesenskiy V.A., Lyashenko T.V., Ivanov Y.P., Nikolov I.I. (1989). EVM i optimizatsiya kompozitsionnykh materialov, Kiev, Budivelnik, 226 p.
2. Tarasevich Y.Y. (2002). Perkolyatsiya: teoriya, prilozheniya, algoritmy. Moscow, Yeditorial URSS. 112 p.
3. Kersh V.Y., Kolesnikov A.V., Kersh D.V. (2015) Sintez gipsovykh kompozitnykh materialov na osnove teorii perkolyatsii, Sukhiye stroitel'nyye smesi, Moscow, 3, 41- 43.
4. Kersh, V., Kolesnikov A., Lyashenko T., Pidkapka M. (2015) Structurally-Oriented Design of the Heat Insulation Plastering Material, No: Proceedings of REHVA Annual Conference 2015, Latvija, Riga, 6-9. maijs. Riga: RTU PRESS. 241.-244.lpp. ISBN 978-9934-10-685-9
5. Kersh V.Y., Kolesnikov A.V., Foshch A.V. (2013). Optimizatsiya struktury i svoystv teploizolyatsionnykh kompozitov na osnove ikh diskretnykh modeley, Visnik ODABA., Odesa: Zovnishreklamservis, 51, 256-260.
6. Drozhzhin, V.S., Pikulin I.V., Savkin G.G. (2002). and others. Cenospheres. Properties and diagnostics, Proceedings SWEMP, Cagliari, Italy, 1059.
7. Mamunya Y. P., Davydenko V.V., Pissis P.P., Lebedev E.V. (2002) Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders, European polymer Journal, 38, 1887-1897.
8. Lyashenko T., Kersh V., Kersh D. (2012). Modelling the effect of composition on the properties of gypsum concrete containing cenospheres. Proc. 18 Ibausil. - Weimar (Germany), V. 1, P. 1-0416-0423.
9. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. (2010). Spravochnik po stroitel'nomu materialovedeniyu, Moscow, Ifra-Inzheneriya, 472 p.
10. Dovgan' I.V., Kersh V.Y., Kolesnikov A.V., Semenova S.V. (2015). Statisticheskoye issledovaniye porovoy struktury teploizolyatsionnykh kompozitov. Visnik ODABA., Odesa: Zovnishreklamservis, 60, 86-90.
11. Kersh V.Y., Kolesnikov A.V. (2013). Fiziko-khimicheskoye osnovy ratsional'nogo vybora komponentov teploizolyatsionnogo materiala. Visnik ODABA. Odesa: Zovnishreklamservis, № 50 (1). 125-130.
12. Dudar I.N. (2001). Termosylova tekhnologiya betonu, Universum-Vinnitsya, 145.

УДК 536.24:620.92:624.13

ВИЛУЧЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ТЕПЛОТИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕПЛОВИХ ТРУБ

Морозов Ю. П.¹ д. т. н., Чалаєв Д. М.² к. т. н., Величко В. В.¹

¹Інститут відновлюваної енергетики НАН України

²Інститут технічної теплофізики НАН України

EXTRACTION OF GEOTHERMAL HEAT USING HEAT PIPES

Yu. P. Morozov¹, D. M. Chalaev^{1,2}, V. V. Velichko¹

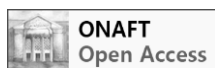
¹Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine, Kyiv

²Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Copyright © 2017 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Анотація. Одним з розповсюджених джерел теплової енергії є природна теплота ґрунту. Предметом дослідження статті є технології видобування геотермальної низькопотенційної теплоти приповерхневих шарів Землі. Розглянуто технології видобування теплоти приповерхневих шарів Землі за допомогою свердловинних теплообмінників і геотермальних теплових насосів. Пропонується використовувати отриману теплоту в теплонасосних системах децентралізованого теплопостачання об'єктів невеликої встановленої потужності (ферми, житлові будівлі, коледжі, офіси, готелі). Перспективною технологією видобування низькопотенційної теплоти приповерхневих шарів Землі є технологія з використанням глибинних геотермальних зондів на основі термосифонних теплових труб. Безнасосний метод вилучення низькопотенційної теплоти приповерхневих шарів Землі за допомогою глибинних термосифонних зондів дозволяє істотно підвищити показник сезонної ефективності (SPF) геотермального теплового насоса. При застосуванні цієї технології немає потреби організовувати примусову циркуляцію робочого тіла, тому що перенос теплоти відбувається шляхом випаровування та конденсації робочого тіла в термосифонній тепловій трубі. Завдяки чому скорочується споживання електричної енергії та підвищується показник сезонної ефективності геотермального теплового насоса. Показані переваги геотермальних свердловинних теплообмінників на основі термосифонних теплових труб в економічному та екологічному аспектах. Розглянуті теплофізичні властивості екологічно безпечних робочих тіл, що використовуються в геотермальних термосифонах, і наве-

дені результати випробовувань експериментального зразка. В якості робочого тіла для геотермального термосифона використовується двоокис вуглецю (R-744). В порівнянні з іншими холодильними агентами для двоокису вуглецю характерний вищий тиск насичення, за рахунок чого забезпечується кращі показники теплопередачі геотермального термосифона. Нами досліджена можливість використання гнучких гофрованих нержавіючих труб вітчизняного виробництва для виготовлення глибинних геотермальних термосифонних зондів. Запропонована перспективна конструкція свердловинного теплообмінника на базі гнучких труб з гвинтовою накаткою гофр. Стікання конденсату по гвинтовій канавці сприяє рівномірному розподілу плівки робочого агента по стінці труби, що забезпечує ефективну теплопередачу на всій довжині теплової труби. Робота виконується за фінансової підтримки НАН України в рамках дослідницької програми «Ресурс».

Abstract. One of the most common sources of thermal energy is the natural heat of the ground. The subject of the research is the technology of geothermal low potential heat extraction from the near-surface layer of the Earth. The technology of heat extraction from the near-surface layer of the Earth using borehole heat exchangers and geothermal heat pumps is considered. The extracted heat is proposed to be used in heat pump systems for decentralized heating objects with small capacity (farms, residential buildings, cottages, offices, hotels). A non-pumping method of extracting the low-potential heat from the near-surface layer of the Earth using deep thermosyphon probes allows to increase significantly the Seasonal Performance Factor (SPF) of a geothermal heat pump. The use of deep geothermal probes based on thermosyphon heat tubes is an advanced technology of low-potential heat extraction from the near-surface layer of the Earth. There is no need to organize forced circulation of the working fluid because heat transfer occurs due to evaporation and condensation of the working fluid in thermosyphon heat tube. The SPF for geothermal heat pump increases due to reduced electricity power consumption. The advantages of geothermal borehole heat exchangers based on thermosyphon heat tubes according to economic and environmental aspects are shown. The properties of environment friendly thermal working fluids used in the geothermal thermosyphon are considered and the result of experimental sample tests is shown. The carbon dioxide (R-744) is used as the working fluid for geothermal thermosyphon. The carbon dioxide has a higher saturation pressure and provides better heat transfer characteristics of the geothermal thermosyphon than the other refrigerants. The possibility of use flexible corrugated stainless steel tubes of domestic production for the manufacture of deep geothermal thermosyphon probes was investigated. A promising design of the borehole heat exchanger based on flexible helical corrugated tubes is proposed. The flow of condensate through the helical groove promotes a uniform distribution of the working agent film along the tube wall, which ensures efficient heat transfer along the whole length of the tube. The work is carried out for financial assistance of NAS of Ukraine within the "Resource" research program.

Ключові слова: геотермальна енергія, свердловинний теплообмінник, термосифон, тепла труба, тепловий насос, теплопостачання.

Keywords: geothermal energy, borehole heat exchanger, thermosiphon, heat pipe, heat pump, heat supply.

Вступ. Останнім часом значний розвиток отримало геотермальне теплопостачання з використанням теплових насосів. За даними Всесвітнього геотермального конгресу з 2010 по 2015 рік використання теплоти приповерхневих шарів Землі для роботи теплових насосів збільшилось з 49% до 55,3% від загального об'єму споживання геотермальної енергії [1, 2]. З метою стимулювання розвитку цього напрямку в Україні в 2016 році прийнята нова редакція закону «Про альтернативні джерела енергії» [3]. Законом визначено, що тепла енергія, яка виробляється тепловими насосами з аеротермальної, гідротермальної або геотермальної енергії, вважається виробленою з відновлюваних джерел енергії за умови, що річний об'єм виробництва теплової енергії таким тепловим насосом більший, ніж об'єм теплової енергії, яку витрачено на виробництво при споживанні ним електричної енергії.

Основна частина. Енергетичні показники теплонасосних систем, що працюють з використанням низькопотенційної теплоти приповерхневих шарів Землі, значно залежать від ефективності вилучення геотермального тепла. Завданням даного дослідження є вивчення можливості використання в якості свердловинних теплообмінників термосифонних теплових труб на базі гнучких гофрованих нержавіючих труб. На теперішній час, в зв'язку з великою вартістю теплових труб, така технологія вилучення геотермального тепла не має широкого використання, а залучення для цих цілей відносно недорогих гнучких нержавіючих труб дозволяє створити прості в виготовленні і зручні в монтажі теплові труби великої довжини.

Приповерхневі шари Землі – це умовне поняття, і за літературними даними маються на увазі глибини до 400 м [4]. На цих глибинах може бути організовано вилучення теплоти гірських порід або підземних поверхневих вод за допомогою свердловинних теплообмінників. В Україні потенціал використання теплової енергії приповерхневих шарів Землі для теплопостачання об'єктів з використанням геотермальних теплових насосів оцінюється в 2 млн. т у.п. в рік [5-7]. Джерелом низькопотенційної теплоти на більшості об'єктів є тепло з геотермальних свердловин глибиною 30-50 м. Об'єкти теплоспоживання в більшості прикладів мають невелику встановлену потужність 18-27 кВт (котеджі, офісні центри, готелі), але відомі і теплонасосні системи потужністю в декілька сот кіловат [8].

При використанні енергії приповерхневих шарів Землі необхідно вирішувати і екологічні проблеми, то- му що у випадку втрати герметичності свердловинних теплообмінників може трапитись забруднення ґрун- тових вод, а при неякісному тампонуванні ствола свердловинного теплообмінника можуть змішуватися води з різних водоносних горизонтів.

Ефективним і екологічно безпечним альтернативним рішенням питання забруднення навколишнього сере- довища є використання геотермальних зондів на основі випарувально-конденсаційних термосифонів [9]. При порівнянні такого рішення з відомими системами на розсолах можна зазначити наступні переваги:

- кращі характеристики теплопередачі ґрунтового зонда;
- вища екологічна безпека (в якості низькокиплячого робочого тіла використовуються екологічно безпе- чні легкокиплячі агенти);
- більш високий показник сезонної ефективності (SPF-Seasonal Performance Factor).

Показник сезонної ефективності збільшується завдяки скороченню споживання електричної енергії за рахунок відсутності примусової циркуляції низькопотенційного теплоносія. Наприклад, в теплонасосній системі опалення індивідуального житлового будинку циркуляційний насос контуру низькопотенційного теплоносія споживає біля 200 Вт. Економія на електричному насосі дозволяє зменшити річне споживання електричної енергії на 360 кВт·год, і це збільшує показник SPF на 15-20% в порівнянні з насосною системою [10].

В геотермальних термосифонних теплових трубах в якості робочого тіла перспективно використовувати теплоносії з високим тиском насичення та більшою густиною пари. З дозволених в теперішній час холоди- льних агентів з екологічної точки зору в першу чергу представляють інтерес так звані «природні» речовини

– етан (R-170), пропан (R-290), циклопропан (RC-270), ізобутан (R-600a), двоокис вуглецю (R-744), пропилен (R-1270). За фізич- ними властивостями одним з найбільш відповідних робочих тіл для геотермальних термосифонів є двоокис вуглецю (R-744). В порівнянні з іншими холодильними агентами R-744 має значно більший тиск насичення [11, 12]. При температурі 0 °С густина пари R-744 в 7 разів вища, ніж у R134a, а величина об'ємної хо- лодильної продуктивності складає 22500 кДж/м³ проти 2900 кДж/м³ для R134a.

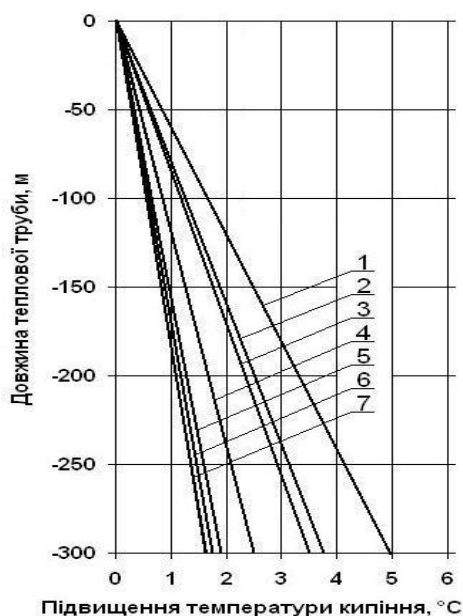
Однією з причин високої ефективності R-744 є також велика величина градієнта тиску насичення (1 бар/К), а також велика потужність охолодження, що приводить до невеликої масової витрати в термосифоні. Деяким недоліком є збільшення тиску насичення (і, відповідно, підвищення температури кипіння) вздовж вертикального термосифона за рахунок тиску стовпа газу (рис. 1). Однак, на експлуатаційні характеристики теплової труби це впливає незначно, тому що підвищення температури кипіння не перевищує 1,5 °С на 100 м глибини зонда.

Ефективність роботи теплової труби в значній мірі залежить від повноти змочування внутрішньої поверхні труби при стіканні рідкого агента. Режим стікання плівки конденсату залежить від конструкції теплової труби, довжини, шорсткості поверхні, а та- кож режиму роботи теплового насоса. В теплових трубах невели- кої довжини для забезпечення рівномірного змочування стінки звичайно встановлюють пористий ґніт (фітіль), однак для геотер- мальних зондів, довжиною до 200 м, це рішення не може бути за- стосовано.

Використання ж звичайних жорстких сталевих труб також є відносно складним і дорогим, тому що в цьому випадку тепла труба повинна збиратися на місці експлуа- тації з декількох окремих труб з проведенням відповідного контролю герметичності з'єднань.

В теплових трубах великої довжини ефективним рішенням є використання гнучких труб з гофрованою поверхнею. Готовий геотермальний зонд необхідної довжини доставляється в згорнутому вигляді на місце монтажу та безпосередньо з обмотки вводиться в канал стовпа.

Зараз в Україні налагоджено промислове виробництво подібних гофрованих нержавіючих труб з кільце- вою та гвинтовою накаткою гофри [13]. Нами досліджено можливість використання таких труб для виготов- лення трубчастих теплообмінників [14] та глибинних геотермальних термосифонних зондів.



- 1 – R744; 2 – R134a; 3 – R22;
4 – R600a; 5 – R290; 6 – R1270;
7 – RC270.

Рис. 1. Вплив тиску стовпа газу в тепловій трубі на температуру кипіння робочого тіла.

Випробовування експериментального зразка термосифонної теплової труби показали, що в зоні випарника труби за рахунок стікання конденсату по гвинтовій канавці відбувається практично повне змочування стінки.

Це забезпечує рівномірне розподілення робочого агента по поверхні труби і ефективний перенос тепла, що підтверджується рівномірністю температурного поля за всією довжиною зони випарника теплової труби.

Дослідження проводяться в рамках цільової програми наукових досліджень НАН України “Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд” (Ресурс-2).

Висновки. Розширення масштабів використання геотермальних теплових насосів в житловому будівництві збільшує потенційний ризик забруднення підземних вод у разі витoku теплоносія. Альтернативою традиційним ґрунтовим теплообмінникам є глибинні геотермальні зонди на основі термосифонних теплових труб. В якості робочих тіл в термосифонах великої довжини необхідно використовувати екологічно безпечні холодоагенти з високим тиском насичення і великою густиною пари. За теплофізичними властивостями одним з найбільш придатних робочих тіл є двоокис вуглецю (R-744). У порівнянні з іншими холодоагентами R-744 має значно більші тиск насичення і величину об'ємної холодопродуктивності. В роботі вивчена можливість використання промислово виготовляємих гнучких гофрованих нержавіючих труб для створення термосифонних теплових труб. Показано, що безнасосний метод вилучення низькопотенційної теплоти приповерхневих шарів Землі за допомогою глибинних термосифонних зондів дозволяє підвищити показник сезонної ефективності (SPF) геотермального теплового насоса на 15-20%.

Література

1. Lund J.W., Boyd T.L. Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review // *Geothermics*. 2016. Vol. 60. P. 66-93.
2. A review of ground investigations for ground source heat pump (GSHP) systems / Luo J. et.al. // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 117. P. 160-175.
3. «Про альтернативні джерела енергії». Закон України № 555-IV. URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/555-15> (дата звернення: 05.05.2017).
4. Thermal use of the underground - Fundamentals, approvals, environmental aspects. VDI 4640 Part 1:2010. URL: https://www.vdi.de/uploads/tx_vdirili/pdf/1540489.pdf (дата звернення: 05.05.2017).
5. Снежкін Ю.Ф. Енергоощадні теплонасосні технології для систем теплопостачання житлово-комунального господарства і промисловості // Вісник Національної академії наук України. 2015. № 7. С. 23–31.
6. Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії / Під заг. ред. А.К. Шидловського. Київ: Українські енциклопедичні знання, 2007. 560 с.
7. Атлас енергетичного потенціалу відновлювальних та нетрадиційних джерел України / Київ: НАН України, Інститут електродинаміки, Державний комітет України з енергозбереження, 2001. 41 с.
8. Реализованные проекты в Украине с применением тепловых насосов // Тепловые насосы сегодня. Информационный бюллетень. 2016. № 1. С. 11-20.
9. Vasiliev L.L. Geothermal energy utilization with heat pipes // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1990. Vol. 59. P. 1186-1190.
10. Ochsner K. Carbon dioxide heat pipe in conjunction with a ground source heat pump (GSHP) // *Applied Thermal Engineering*. 2008. Vol. 28. P. 2077-2082.
11. Теплофизические свойства фреонов. т.1. //Алтуниин В.В. и др. / Под ред. С.Л. Ривкина. М.: Издательство стандартов, 1980. 232 с.
12. Теплофизические свойства фреонов. т.2. / Алтуниин В.В. и др. // Под ред. С.Л. Ривкина. М.: Издательство стандартов, 1985. 264 с.
13. ECO-FLEX. Сильфонные шланги из нержавеющей стали. URL: <http://www.eco-flex.com.ua> (дата звернення: 05.05.2017).
14. Heat transfer enhancement in corrugated tube heat exchanger / Chalaev D. et.al. // *Ukrainian Journal of Food Science*. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 376-386.

References

1. Lund J.W., Boyd T.L. (2016). Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. *Geothermics*, 60, 66-93.
2. Luo J., Rohn J., Xiang W., Bertermann D., Blum P. (2016). A review of ground investigations for ground source heat pump (GSHP) systems. *Energy and Buildings*, 117, 160-175.
3. «Pro alternatyvni dzherela enerhii». Zakon Ukrainy № 555-IV. Retrieved from <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/555-15>

4. Thermal use of the underground - Fundamentals, approvals, environmental aspects. VDI 4640 Part 1:2010. Retrieved from https://www.vdi.de/uploads/tx_vdirili/pdf/1540489.pdf
5. Sniezkin Yu.F. (2015). Enerhooshchadni teplonasosni tekhnologii dlia system teplopostachannia zhytlovo-komunalnoho hospodarstva i promyslovosti. Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy, 7, 23-31.
6. Enerhoefektyvnist ta vidnovliuvalni dzherela enerhii (2007) / Pid zah. red. A.K. Shydlovskoho. Kyiv: Ukrain-ski entsyklopedychni znannia, 560.
7. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvalnykh ta netradytsiinykh dzherel Ukrainy (2001) / Kyiv: NAN Ukrainy, Instytut elektrodynamiky, Derzhavnyi komitet Ukrainy z enerhozberezhennia, 41.
8. Realizovannyie proyekty v Ukraine s primeneniemyem teplovykh nasosov (2016). Teplovyie nasosy segodnya. Informatsionnyy byulleten, 1, 11-20.
9. Vasiliev L.L. (1990). Geothermal energy utilization with heat pipes. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 59, 1186-1190.
10. Ochsner K. (2008). Carbon dioxide heat pipe in conjunction with a ground source heat pump (GSHP). *Applied Thermal Engineering*, 28, 2077-2082.
11. Altunin V.V., Geller V.Z., Petrov Ye.K., Rasskazov D.S., Spiridonov G.A. (1980). Teplofizicheskiye svoystva freonov. t.1. / Pod red. S.L. Rivkina. M.: Izdatel'stvo standartov, 232.
12. Altunin V.V., Geller V.Z., Kremenevskaya Ye.A., Perel'shteyn I.I., Petrov Ye.K. (1985) Teplofizicheskiye svoystva freonov. t.2. / Pod red. S.L. Rivkina. M.: Izdatel'stvo standartov, 264.
13. ECO-FLEX. Sil'fonnyie shlangi iz nerzhaveyushchey stali. Retrieved from <http://www.eco-flex.com.ua>
14. Chalaev D., Silnyagina N., Shmatok A., Nedbailo A. (2016). Heat transfer enhancement in corrugated tube heat exchanger. *Ukrainian Journal of Food Science*, 5(2), 376-386.

УДК [664.78:631.576.4]:[66.2.7:57]

ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ КРУП'ЯНОГО ВИРОБНИЦТВА ЯК СИРОВИНИ ДЛЯ БІОПАЛИВА

Хоренжий Н. В., к.т.н., доц., Лапінська А. П., к.т.н., доц.

Перетяка С. М., к.т.н., доц., Детков Г. Г., студ.

Одеська національна академія харчових технологій

SUBSTANTIATION OF EXPEDIENCY OF USE OF WASTE PRODUCTS OF CEREAL MANUFACTURE AS RAW MATERIAL FOR BIOFUEL

Khorenzhyi N. V., Ph.D., Associate professor, Lapinska A. P., Ph.D., Associate professor, Pertiaka S. M.

Ph.D., Associate professor, Detkov G. G., student

Odessa National Academy of Food Technologies

Copyright © 2017 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Анотація. У статті аналізується структура виробництва зернових в Україні, виявлено, що при обробці зерна в крупі утворюється значна частина вторинних матеріальних ресурсів (борошна та лушпиння). Тому важливо використовувати лушпиння зернових як сировину для виробництва біопалива. Метою роботи є розширення ресурсної бази біопалива за рахунок відходів виробництва зернових. Для досягнення цієї мети формуються цілі дослідження. Об'єктом дослідження є технологічний процес переробки відходів зернових рослин, режимів окремих технологічних процесів, зокрема, підготовка сполучного матеріалу. Предметом дослідження є мука і лушпиння вівса та ячменю, що зв'язують речовини (ячмінна паста). Визначено фізичні властивості відходів від переробки злаків. Встановлено, що лушпиння незалежно від його виду володіє властивостями: низькою текучою здатністю, великим кутом навалного схилу, малим об'ємним маслом у порівнянні з борошном. Сировина для виробництва біопалива істотно відрізняється за розмірами частинок, насипною щільністю і питомою вагою, вологістю, міцністю частинок матеріалу, хімічним складом сировини, тому рекомендується тиснути на підвищення температури палива. Проаналізовано різні способи виробництва біопалива, було доведено, що є також недоліки брикетів і гранул, отриманих без зв'язувальних речовин, одним з яких є проблема міжміського транспортування, внаслідок чого значна кількість натисненого біопалива знищується через до підвищення вологості і, як наслідок, теплотворних властивостей. Паливні гранули виготовляють головним чином без додавання зв'язуючого матеріалу, тоді як для виробництва