

9. Снайман Х., Хармс Т. және Страусс Дж., Стирлинг қозғалтқыштарына арналған дизайнды талдау әдістері // Оңтүстік Африкадағы энергия журналы. 2008. том. 19, №. 3. 4–19 б.

10. Салем Гоззи, Р.Бухануф. Еркін поршеньді стирлинг қозғалтқышының жаңа механикалық орналасуын компьютерлік модельдеу // Журнал. Таза Энер. Техн., 2015. Т. 3, жоқ. 2. 140–144-беттер. DOI: 10.7763/JOCET.2015.V3.184.

11. Сутапат Кванкаоменг, Бантернг Силпсакулсук, Понгнарин Савангвонг. Еркін поршеньді қозғалтқыштың тұрақтылығы мен өнімділігін зерттеу // Энергия процедурасы. 2014, том. 52. 598–609 б.

12. Farid ZM, Faiz RM, Rosli AB and Kumaran K. Rombic drive beta-configuration Stirling қозғалтқышының термодинамикалық өнімділігін болжау // Машина жасау бойынша 1-ші халықаралық дипломнан кейінгі конференция (IPСME 2018), doi: 10.1088/1757-899/X/1/012048

13. Довгялло А.И., Некрасова С.О., Пулкина А.Ю. Еркін поршеньді Стирлинг қозғалтқышының жұмыс процесін модельдеу негіздері. – Самара: Самара университетінің баспасы, 2020.

14. Лоицнский Л.Г. Сұйық және газ механикасы.–М.: Наука, 1987.

15. Ухин Б.В., Гусев А.А. Гидравлика: Оқулық. – М.: Инфра-М, 2010.

ӘОЖ 536.8

ШАҒЫН ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫН ӨНДІРУГЕ АРНАЛҒАН БОС ЖҰМЫС ПОРШЕНІ БАР СТИРЛИНГ МАШИНАНЫ (ҚОЗҒАЛТҚЫШЫН) ЖОБАЛАУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ. 2. СИМУЛЯЦИЯ НӘТИЖЕЛЕРІ

¹Киікбаев Нұрымбет, ¹Алламжарова Сымбат, ²Ерзада Майра
allamjarovasyambat@gmail.com, nurymbetkikbaev8@gmail.com

Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

¹«Электрэнергетика» кафедрасы магистранттары

²PhD, «Электрэнергетика» кафедрасы доценті

Стирлинг қозғалтқышы изотермиялық жуықтауда модельденді. Бастапқы кезеңде қозғалтқышта жоғары жиілікті ($\sim 10^2$ Герц немесе одан көп) және төмен жиілікті (~ 10 Герц немесе одан аз) тербелістер пайда болады. Жұмыс поршені мен орын ауыстырғыштың қозғалысы төмен жиілікті тербелістерге сәйкес келеді. Қыздырғыш пен салқындатқыштың арасында минималды температура айырмашылығы бар, одан төмен бос поршеньді қозғалтқыш жұмыс істемейді, бірақ Стирлинг қозғалтқышының басқа түрі сияқты жұмыс істей алады.

Түйінді сөздер: электр энергиясын өндіру, бос жұмыс істейтін поршеньді Стирлинг машинасы, регенератор, термодинамикалық Стирлинг циклі.

Кіріспе. Модельдеу үшін келесі теңдеулер жүйесі қолданылады:

$$m_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} + k_d (x_d - x_{d,0}) = p_b A_{rod} + p_c A_p - p_e A_d, \quad (1)$$

$$m_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} + D_p x'_p = (p_b - p_c) A_p. \quad (2)$$

Қысымды анықтау формулалары:

$$p_b = p_0 \left(\frac{V_{b,0}}{V_b} \right)^\gamma, \quad (3)$$

$$p_c = \frac{R_g T_c}{V_c} m_c, \quad p_e = \frac{R_g T_e}{V_e} m_e. \quad (4)$$

Мұнда қамтылған көлемдер формулалар арқылы табылады

$$V_c = V_{c,0} + A_p (x_d - x_{d,0} - x_p), \quad (5)$$

$$V_e = V_{e,0} - A_d (x_d - x_{d,0}), \quad V_b = V_{b,0} - A_p (x_d - x_{d,0} - x_p).$$

Қыздырғыштағы m_e және ығыстырғышындағы m_c газ массасының теңдеулері:

$$\frac{dm_c}{dt} = -m'_r, \quad \frac{dm_e}{dt} = m'_r. \quad (6)$$

Регенератордағы газдың массалық шығыны m'_r теңдеуінен табылады

$$\frac{dm'_r}{dt} = \frac{A_r}{L_r} \Delta p - \frac{1}{2} \frac{K_\Sigma |m'_r|}{m_r} m'_r, \quad (7)$$

$$K_\Sigma = K_r + \frac{L_r}{d_r} \zeta, \quad m_r = \rho_r L_r A_r = \rho_r V_r, \quad V_r = L_r A_r. \quad (8)$$

Регенератордағы газдың тығыздығы ρ_r күй теңдеуінен анықталады

$$\rho_r = \frac{p_e + p_c}{(T_e + T_c) R_g}. \quad (9)$$

Модельдеу нәтижелері. (1), (2), (6) және (7) теңдеулер негізгі болып табылады.

Оларға көмекші теңдіктер қосылады (3)–(5), (8) және (9).

Теңдеулердің сандық шешімі Рунге-Кутта [1] әдісімен және алынған нәтижелердің дұрыстығын тексеру үшін әртүрлі уақыт қадамдарымен жүзеге асырылды.

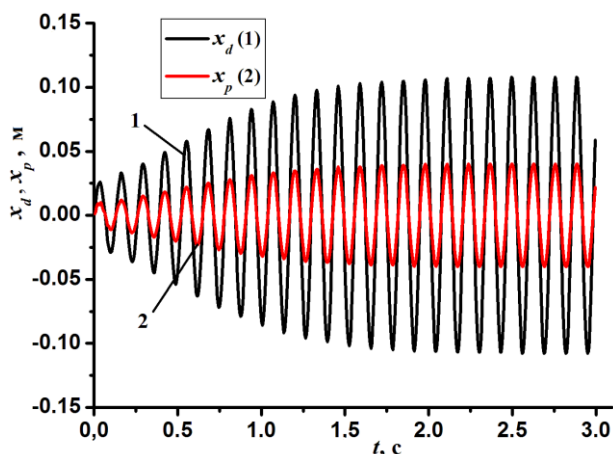
Есептеулер келесі параметрлер арқылы орындалды:

- ығыстырғыш және жұмыс поршені–
 $m_d = 0.05$, $m_p = 0.15$ кг, $k_d = 100$ кг·с⁻²; $A_{rod} = 10^{-2}$, $A_d = 4.5 \cdot 10^{-2}$ м²; $x_{d,0} = 0.06$ м;
 $D_p = 2.0$ кг·с⁻¹; $\gamma = 1.4$, $R_g = 287$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹;
- жылытқыш және салқындатқыш–
 $T_c = 293$, $T_e = 593$ К; $p_0 = 10^5$ Па; $V_{e,0} = 5.4 \cdot 10^{-3}$, $V_{b,0} = 10^{-5}$, $V_{c,0} = 5.7 \cdot 10^{-3}$ м³;
- регенератор–

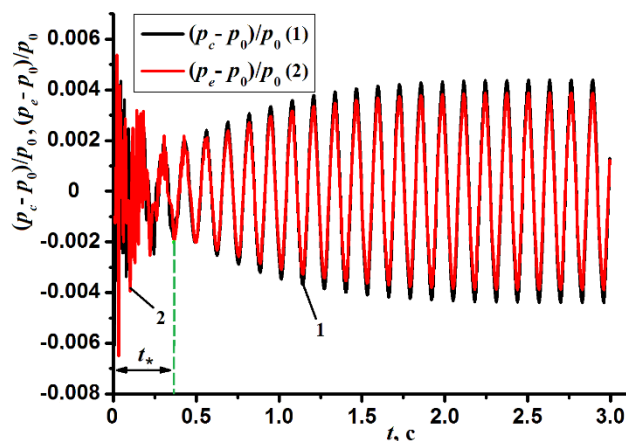
$$L_r = 1.8 \cdot 10^{-1}, \quad d_r = 10^{-2} \text{ м}, \quad A_r = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2; \quad K_r = 1.0, \quad \zeta = 0.03.$$

Стирлинг қозғалтқышының «ІСКЕ ҚОСЫЛУЫ» бастапқы $x'_d(t = 0) = 1$ м/с жылдамдығында. Жұмыс поршені мен ығыстырғыш 0,13 с периодпен қатаң синхронды түрде қозғалады (1-сурет), x_d және x_p арасындағы фазалық ығысу мынаған тең $\varphi = 0$, олардың тербелістерінің максималды амплитудалары 0,12 және 0,04 м.

Ығыстырушы мен поршень координаталарының уақытқа тәуелділіктері (1-сурет), салқындатқыш пен қыздырғыштағы қысымның салыстырмалы өзгерістері (2-сурет) көрсетілген.



1-сурет. Ығыстырушы (кр. 1) және жұмыс поршенинің (кр. 2) координаталары уақытының өзгеруі



2-сурет. Салқындатқыштағы (1 қисық) және қыздырғыштағы (қисық 2) уақыт бойынша салыстырмалы қысымның өзгеруі

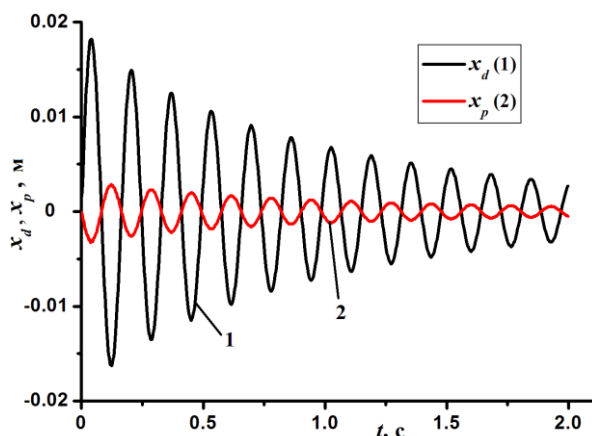
Қозғалтқыш тұрақты және циклдік жұмыс режиміне жеткенге дейін уақыт $t_* = 0.37$, p_c және p_e қысымдары жоғары жиілікпен және кездейсоқ өзгереді, мұнда сипаттамалық периодтары 0,002 және 0,022 с болатын бірнеше тербелістердің қосылуы анықталды (2-сурет). Жоғары жиілікті тербелістер 1 - суретте көрінбейді, бірақ шын мәнінде олар x_d және x_p координаталарының төмен амплитудалы ауытқулары түрінде болады.

Буфер көлемі $V_{b,0}$ оны қарастырудан шығару үшін өте үлкен деп алынады. Бұл қозғалтқыштың жұмысына жалпы теріс әсер етеді, бір жағынан жоғары жиілікті тербелістердің амплитудасы төмендейді, бірақ сонымен бірге ығыстырғыш пен поршеньді қарама-қарсы фазаларда қозғалуға мәжбүр етеді. Қозғалтқыштың қалыпты жұмыс істеуі үшін олар синхронды тербелістерді орындауы керек (1-сурет).

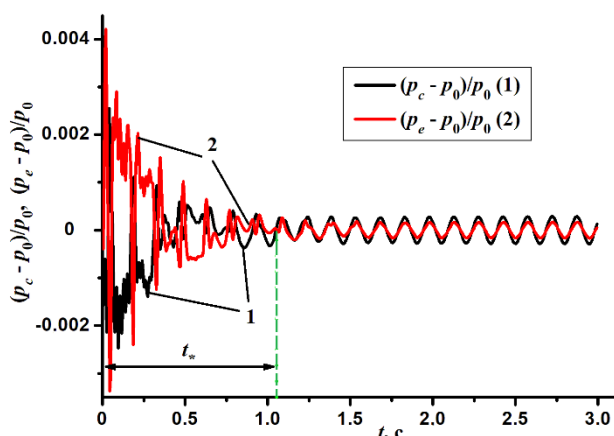
3-суретте $V_{b,0} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ үшін модельдеу нәтижелері көрсетілген, мұнда «іске қосудан» кейін қозғалтқыштың біртіндеп тоқтауы көрінеді. Айта кету керек, x_d және x_p тербелістерінің амплитудасындағы айырмашылықтың жоғарылауы, сондай-ақ олардың асинхрондылығы, олардың арасындағы фазалық ығысу тең $\varphi = \pi$.

Егер (10) массалық шығынды m'_r табудың орнына Дарси-Вейсбах теңдеуін қолданылса ([2]-да орындалғандай), содан кейін орын ауыстырғыш пен поршеньдің бастапқыда пайда болған тербелмелі қозғалыстары тез өшеді және қозғалтқыш тоқтайды.

Буферлік кеңістіктің әсерін қайтадан алып тастайық, енді қыздырғыш пен салқындатқыш арасындағы температура айырмашылығы $\Delta T = T_e - T_c$ төмендеген кезде «Сыртқы жүктеме» сипаттамасының тұрақты мәніндегі $D_p = 2.0 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ қозғалтқыштың жұмысын қарастырамыз. Азаюымен ΔT қысымның ауытқуының амплитудасы және x_d және x_p координаталары да төмендейді; көбінесе олардың өсу бағыттары тікелей қарама-қарсы; салқындатқыш пен жылытқыштағы қысымның кездейсоқ ауытқу уақыты t_* артады. Мысалы, $\Delta T = 140 \text{ K}$ болғанда, амплитудалары x_d және x_p сәйкесінше 0,027 және 0,004 м; $t_{**} = 1,05 \text{ с}$ (5-сурет).



3-сурет. V_b буфер көлемінің әсерінен Стирлинг қозғалтқышының біртіндеп тоқтауы; 1 – x_d ; 2 – x_p



4 - сурет. Кішігірім температура ΔT айырмашылықтарындағы салқындатқыштағы (кр. 1) және қыздырғыштағы (кр. 2) салыстырмалы қысымдар

Уақыт $t = t_*$ өткеннен кейін қозғалтқыш тұрақты жұмыс режиміне ауысады, бірақ қысымның ауытқуы p_c және p_e (сондай-ақ x_d және x_p арасында) арасында қазір шамалы фазалық ығысу бар. Жұмыс поршені мен ығыстырғыштың тербелмелі қозғалыстары арасындағы фазалық ығысудың болуы Стирлинг машинасының тұрақты жұмысына теріс әсер етеді, бұл уақытта $t < t_*$ 4 және 5 - суреттегі нәтижелермен көрсетілген.

Мұндай құбылыстар температура $\Delta T = 105$ К айырмашылығына дейін байқалады, төменірек ΔT қозғалтқыш жұмыс істей алмайды, сонымен қатар фазалық ығысу π -ге және $x_p = 0$ жақын. Бірақ $x_d \neq 0$ болса, бұл бос поршеньді қозғалтқышты Стирлинг қозғалтқышының басқа түріне түрлендіруді білдіреді [3], содан кейін электр энергиясын өндіру үшін орын ауыстырғышты пайдалану керек.

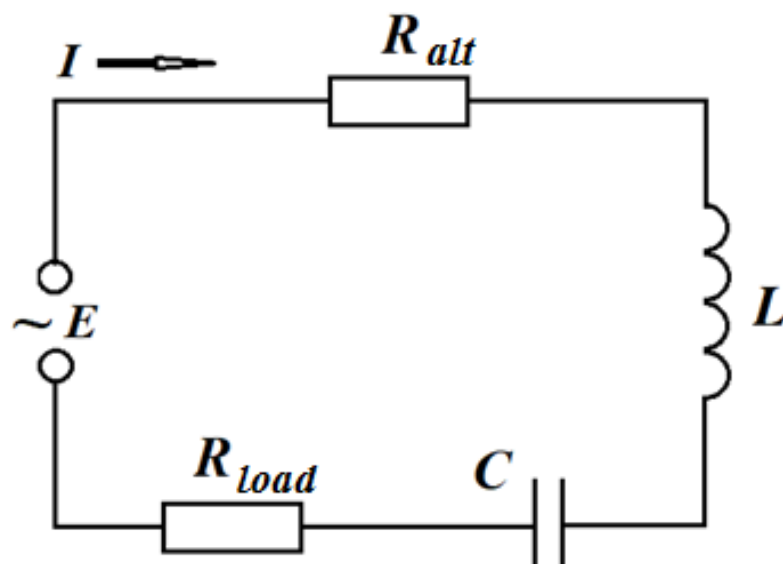
Тұрақтылықтың температура $\Delta T = 105$ К шегінде D_p ұлғаюы x_d және x_p амплитудаларының ұлғаюына және $\varphi = 0$ мәнге оралуына әкеледі. D_p 2-ден 20 кг/с-қа дейінгі өзгерістер диапазонында x_d және x_p амплитудалары сәйкесінше 0,011 және 0,001 м-ден 0,106 және 0,007 м-ге дейін артады $D_p > 20$ кг/с кезінде амплитудасы тербеліс x_d соншалықты күшті өседі, көлем $V_d \rightarrow 0$.

Электр энергиясын өндіруді есептеу. Бұл мәселе электр генераторының поршеньді демпфирлеуіне тікелей байланысты және жоғарыда көрсетілген D_p параметрімен анықталады. Айнымалы тоқ поршеньді-қозғалтқыш конфигурациясы поршеньнен, поршеньге бекітілген магниттерден және поршеньдік магниттерді қоршап тұрған сым катушкаларынан тұрады. Магниттер катушкаларға өте жақын орналасқан. Бұл генератордың Е кернеуін поршень жылдамдығының сызықтық функциясы ретінде келесідей есептеуге мүмкіндік береді:

$$E = k_{alt} \frac{dx_p}{dt}, \quad (14)$$

мұнда Е–генератордың кернеуі (ЕҚК); k_{alt} = генератор тұрақтысы (38,5 В·см).

Бұл кернеу генератор катушкаларында ток индукциялайды, ол электр тізбегін сипаттайтын екінші ретті теңдеу (6-сурет) арқылы есептелуі керек, элементтерді қамтитын —резисторлар R_{alt} (ішкі генератордың кедергісі), R_{load} (жүктеме кедергісі); L —генератор индуктивтілігі; C —тізбектің электр сыйымдылығы.



5-сурет. RLC тізбегі бар электр генераторының схемасы.

I тізбегіндегі кернеу E, поршеньдік координат x_p және ток күші бір-бірімен [4] теңдеу бойынша байланысқан.

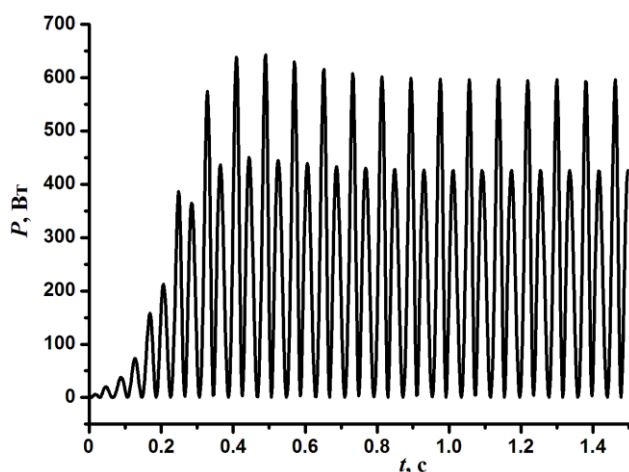
$$\frac{dE}{dt} = k_{alt} \frac{d^2 x_p}{dt^2} = L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I, \quad (15)$$

$$R = R_{alt} + R_{load},$$

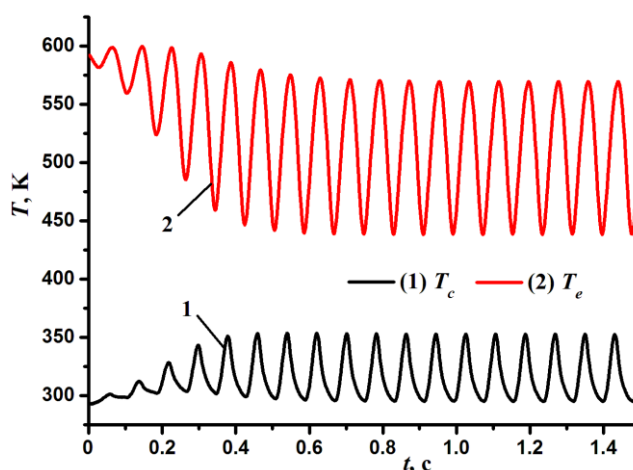
өйткені конденсаторлар көбінесе Стирлинг түрлендіргіштерінде кездеседі.

(15) теңдеуден есептелген токты пайдаланып, ток, кернеу және ПӘК көбейту арқылы қозғалтқыш өндіретін электр қуаты P есептелді.

Жұмыс сонымен қатар изотермиялық емес жуықтауда модельдеу жүргізілді, бұл тәсіл машинаның нақты жұмысын дәлірек сипаттайды. Өндірілген электр қуаты P, 6-суретте көрсетілген және қыздырғыш пен тоңазытқыштың температуралары 7-суретте көрсетілген., бұл деректер қозғалтқыштың геометриялық және термофизикалық параметрлері ұқсас болатын [5] тәжірибелік деректерімен жақсы сәйкес келеді. Ол құрылымы бойынша 1-суреттен ерекшеленсе де, бірақ Стирлинг қозғалтқышы болып табылады.



6-сурет. P -ның t уақытына тәуелділігі



7-сурет. t уақытынан бастап тоңазытқыштың T_c және жылытқыш T_e температураларының өзгеруі

Қорытынды. Стирлинг қозғалтқышының ұсынылған жаңа моделі және алдын ала жүргізілген зерттеулердің нәтижелері мынаны көрсетеді: Стирлинг қозғалтқышында циклдік термодинамикалық процестің пайда болуы үшін гидродинамикалық сипаттағы регенератордың релаксациялық қасиеті маңызды; әйтпесе қозғалтқыш жұмыс істемейді. D_p параметрімен сипатталатын «сыртқы электр жүктемесін» қосу да қозғалтқыштың тұрақты жұмысына әкелуі мүмкін.

Стирлинг қозғалтқышы «іске қосылғанда» бастапқы кезең бірнеше жиіліктегі оннан мыңдаған герцке дейінгі қарапайым гармоникалық тербелістердің қосындысы болып табылатын кездейсоқ тербелістердің пайда болуымен бірге жүреді. Жиілігі 10^3 Гц тербелістердің болу мүмкіндігі регенератордағы гидродинамикалық процестерді дәлірек модельдеу қажеттілігін көрсетеді және (1) теңдеудің орнына басқаларын қолдану қажет.

Жұмыс поршені мен ығыстырғыштың тербелістері арасындағы фазалық ығысудың пайда болуы тиісті емес; бос поршеньді Стирлинг қозғалтқышының тұрақты жұмысы үшін ең қауіптісі фазалық ығысу болып табылады $\varphi \approx \pi$. $\Delta T = 0$ тұрақты циклдік процестер болмайды.

Пайдаланған әдебиеттер тізімі

1. Калиткин Н.Н. Сандық әдістер. –М.: Академия, 2013.
2. Сабденов Қ.О., Ерзада М., Сүлейменов А.Т. Метан мен азотты пайдаланатын тізбекті жылу қозғалтқышы арқылы ғарышта энергияны түрлендіру мүмкіндігін зерттеу // Engineering and Physical Journal. 2019. Т. 92, № 3. 596–607 б.
3. Оқырман Г., Хупер С. Стирлинг қозғалтқыштары: Аударма. ағылшын тілінен – М.: Мир, 1986.
4. Ланглуа, Джастин Л.Р. Стирлинг ғарыштық ядролық энергетикалық жүйесінің динамикалық компьютерлік моделі. Trident Scholar жобасының есебі №. 345. – Аннаполис: АҚШ Әскери-теңіз академиясы, 2006.
5. Wong NM, and Goh SY. Стирлинг қозғалтқышындағы синусоидалы қозғалыс пен синусоидалы емес қозғалысты эксперименттік салыстыру. // Журнал. Мех. Ағылш., ғылым. (JMES). 2020, том. 14, 3-басылым, 6971–6981 б.

УДК 621.1

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ИСХОДНОГО СЫРЬЯ НА ПРОЧНОСТЬ ТОПЛИВНЫХ ГРАНУЛ ИЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ

¹Аргимбаева Гүлсезим Алтайқызы, ²Карманов Амангельды Ерболович,
³Никифоров Александр Степанович
aman270685@mail.ru

Торайгыров университет, г.Павлодар, Казахстан

¹магистрант кафедры «Теплоэнергетика»

²PhD, ассоциированный профессор кафедры «Теплоэнергетика»

³доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»

Исследование прочности топливных гранул из сельскохозяйственных отходов является важным аспектом их производства и использования. Свойства исходного сырья, такие как тип и состояние отходов, их влажность, плотность и химический состав, могут оказывать существенное влияние на прочность гранул и, следовательно, на их эффективность в качестве топлива.

Например, использование различных видов сельскохозяйственных отходов, таких как солома, опилки, жмых, или биомасса растений, может привести к различиям в механических