UO‘K 662.767.2:620.9

KICHIK HAJMLI BIOGAZ QURILMASINING ENERGETIK PARAMETRLARINI ASOSLASH: ILMIY ADABIYOTLARNING TANQIDIY TAHLILI

Uzakov Orif Hamroyevich,
Buxoro davlat universiteti “Muhandislik texnologiyalari va qayta tiklanuvchi energiya manbalari” kafedrasi dotsenti
Karimova Mahbuba Nutfullayeva,
Buxoro davlat universiteti “Muhandislik texnologiyalari va qayta tiklanuvchi energiya manbalari” kafedrasi dotsenti
Oltiboyev Sherzod Olim o‘g‘li,
Buxoro davlat universiteti “Muhandislik texnologiyalari va qayta tiklanuvchi energiya manbalari” kafedrasi magistranti
sherzodoltıboyev83@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4340-7861

Annotatsiya. *Maqolada kichik hajmli biogaz qurilmalarining energetik parametrlarini asoslashga oid ilmiy ishlar tanqidiy tahlil qilinadi. Tadqiqotning maqsadi reaktor hajmi, organik yuklama, gidravlik ushlab turish vaqti, fermentatsiya harorati va issiqlik izolyatsiyasini sof foydali energiya mezoni bo‘yicha o‘zaro bog‘lashdan iborat. Qiyosiy tahlil, o‘lchov birliklarini muvofiqlashtirish va energiya balansi usullari qo‘llanildi. Tahlil metan unumdorligining ortishi energetik samaradorlikning mutanosib oshishini anglatmasligini ko‘rsatadi. Issiqlik bilan o‘zini ta’minlash sharti, minimal zarur metan chiqishi hamda haroratni oshirishning chegaraviy energetik mezoni ifodalandi. Laboratoriya metan potensialini ekspluatatsion gaz chiqishi bilan almashtirish va elektr energiyasini issiqlikka tenglashtirish cheklovlari yoritildi. Natijalar mahalliy xomashyo xususiyatlari va iqlim sharoitida tekshirilishi lozim bo‘lgan parametrlarni tanlash uchun metodik asos beradi.*

Kalit so‘zlar: *biogaz, anaerob bijg‘ish, energiya balansi, issiqlik izolyatsiyasi, metan chiqishi, organik yuklama, gidravlik ushlab turish vaqti, issiqlik rekuperatsiyasi, sof foydali energiya.*

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАЛОГАБАРИТНОЙ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ: КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Аннотация. *В статье критически рассмотрены научные работы по обоснованию энергетических параметров малогабаритных биогазовых установок. Цель исследования — связать объём реактора, органическую нагрузку, гидравлическое время удерживания, температуру сбраживания и теплоизоляцию с критерием полезной энергии за вычетом собственных потребностей. Применены сравнительный анализ, согласование единиц измерения и энергетический баланс. Показано, что увеличение выхода метана не обязательно обеспечивает пропорциональное повышение энергетической эффективности. Сформулированы условие тепловой самообеспеченности, минимально необходимый выход метана и предельный критерий целесообразности повышения температуры. Рассмотрены ограничения переноса лабораторного метанового потенциала на эксплуатационные условия и прямого сопоставления электрической и тепловой энергии. Результаты служат методической основой выбора параметров, требующих проверки для местного сырья и климатических условий.*

Ключевые слова: *биогаз, анаэробное сбраживание, энергетический баланс, теплоизоляция, выход метана, органическая нагрузка, гидравлическое время удерживания, рекуперация теплоты, полезная энергия.*

JUSTIFICATION OF THE ENERGY PARAMETERS OF A SMALL-SCALE BIOGAS PLANT: A CRITICAL REVIEW OF SCIENTIFIC LITERATURE

Abstract. *This article critically examines scientific studies on the energy parameters of small-scale biogas plants. It aims to connect reactor volume, organic loading, hydraulic retention time, digestion*

temperature, and insulation through a net useful energy criterion. Comparative analysis, harmonisation of measurement units, and energy balances are applied. Increased methane yield does not necessarily produce a proportional improvement in energy performance. Conditions for thermal self-sufficiency, minimum methane yield, and the marginal energy benefit of increasing temperature are formulated. Limitations of transferring laboratory methane potentials to operational conditions and directly equating electricity with heat are examined. The findings provide a methodological basis for selecting parameters that require validation for local feedstocks and climatic conditions.

Keywords: *biogas, anaerobic digestion, energy balance, thermal insulation, methane yield, organic loading, hydraulic retention time, heat recovery, net useful energy.*

Kirish. Kichik hajmli biogaz qurilmasi organik xomashyoning biologik parchalanishi bilan issiqlik va energiya almashinuvi birgalikda kechadigan tizimdir. Uning energetik imkoniyatini faqat reaktor sig‘imi yoki bir sutkada ajraladigan gaz hajmi orqali ifodalash yetarli emas. Bir xil gaz ishlab chiqaradigan ikkita qurilmada substratni isitish, tashqi muhitga issiqlik yo‘qotilishi va yordamchi uskunalar sarfi turlicha bo‘lishi mumkin. Shuning uchun iste’molchiga yetkaziladigan foydali energiya qurilmani baholashning asosiy ko‘rsatkichi bo‘lishi kerak.

Rennuit va Sommer [1] sovuq mavsumli hududlar uchun reaktor hajmi, xomashyo oqimi va isitish ehtiyojini bog‘laydigan modelni ishlab chiqqan. Calise va hammualliflar [2] biokimyoviy jarayon bilan issiqlik almashinuvini birgalikda modellashtirgan. Bu yo‘nalishlar gaz hosil bo‘lishi va issiqlik sarfini o‘zaro aloqada ko‘rish zarurligini asoslaydi. Biroq yirik qurilmaga tegishli issiqlik ko‘rsatkichlarini kichik reaktorga hajmga mutanosib ravishda ko‘chirish geometrik va ekspluatatsion farqlarni yashiradi.

Mazkur maqolaning maqsadi xalqaro ilmiy nashrlardagi natijalarni tanqidiy umumlashtirish orqali kichik hajmli qurilmaning energetik parametrlarini tanlash uchun izchil mezonlar tizimini shakllantirishdir. Asosiy savol quyidagicha qo‘yiladi: xomashyo ta’minoti cheklangan sharoitda harorat, ushlab turish vaqti va izolyatsiya qanday bog‘langanda qurilma texnologik ehtiyojidan ortiq foydali energiya bera oladi? Maqola ilmiy-tahliliy xususiyatga ega; unda yangi tajriba o‘tkazilgani yoki universal optimal parametrlar topilgani da’vo qilinmaydi.

Tadqiqot materiallari va usullari. Tahlil uchun issiqlik almashinuvi, reaktorni isitish, harorat va organik yuklama ta’siri, shuningdek metan potensialini o‘lchash metodikasiga oid ilmiy ishlar tanlandi [1–8]. Qidiruvda “small-scale biogas digester”, “anaerobic digestion heat balance”, “thermal insulation”, “hydraulic retention time” va “biomethane potential” birikmalaridan foydalanildi. Manbalarning bibliografik ma’lumotlari hamda foydalanilgan natijalari tekshirildi. Mazkur tanlov to‘liq metatahlil sifatida talqin qilinmaydi.

Taqqoslashda xomashyo turi, reaktor konfiguratsiyasi, harorat, gaz hajmini keltirish sharoiti, metan chiqishining massa bazasi va energiya balansining chegarasi hisobga olindi. TS, VS, yangi xomashyo massasi hamda COD bo‘yicha berilgan ko‘rsatkichlar alohida talqin qilindi.

Hisoblarda sutkalik vaqt bazasi qabul qilindi: energiya kWh/sutka, elektr quvvati kW, hajmiy oqim m^3/sutka bilan ifodalandi. Laboratoriya metan potensiali (BMP) ekspluatatsion metan chiqishidan ajratib baholandi [6, 7].

Natijalar va muhokama.

1. Ilmiy manbalarning qiyosiy tahlili

1-jadval. Energetik parametrlarni tanlashga aloqador tadqiqotlar va ularni qo‘llash chegaralari

Manba	O‘rganilgan masala va asosiy dalil	Kichik qurilma uchun talqin va cheklov
Rennuit va Sommer, 2013 [1]	Sovuq mavsumda reaktorning issiqlik ehtiyoji va gaz ishlab chiqarishini birgalikda baholovchi model	Isitishga sarflangan biogaz hisobga olinadi; modelni boshqa hududga ko‘chirishda iqlim va konstruksiya yangilanadi.
Calise va boshq., 2020 [2]	Organik chiqindilar uchun bog‘langan biokimyoviy va issiqlik modeli	Haroratni tashqi omillardan mustaqil parametr deb bo‘lmaydi; maishiy organik chiqindi natijalari go‘ngga bevosita ko‘chirilmaydi.

Manba	O‘rganilgan masala va asosiy dalil	Kichik qurilma uchun talqin va cheklov
Ramos-Suárez va boshq., 2024 [3]	Har biri 4 m³ ishchi hajmli quvursimon reaktorlarda pishloq zardobi; bittasida 30 ± 3 °C harorat nazorati	Isitish foydasi izolyatsiya va kiruvchi xomashyo haroratiga bog‘liq; iliq zardob sovuq go‘ng suspenziyasiga tenglashtirilmaydi.
Moset va boshq., 2015 [4]	Qoramol go‘ngida mezofil va termofil rejimlar; turli miqyos va ushlab turish vaqtlari	Biologik afzallikni aniqlaydi; u o‘z-o‘zidan sof energetik ustunlikni isbotlamaydi.
Ahlberg-Eliasson va boshq., 2021 [5]	Go‘ng tarkibi, organik yuklama va haroratning jarayonga ta’siri	Yuqori haroratning natijasi substrat va ingibitsiyaga bog‘liq; bitta universal rejimni tavsiya etish cheklangan.
Holliger va boshq., 2016; 2021 [6, 7]	BMP sinovlarini standartlashtirish va validatsiya mezonlarini yangilash	Gaz potensiali ishonchli o‘lchanishi kerak; BMP amaldagi reaktor chiqishiga aynan teng emas.
Batstone va boshq., 2002 [8]	Anaerob bijg‘ishning ADM1 modeli	Biokimyoviy modellashtirish uchun asos; termik balans va mahalliy kalibrlash alohida talab qilinadi.

Ko‘rib chiqilgan ishlar biologik unumdorlik va issiqlik sarfini turli tizim chegaralarida baholaydi. Shu sababli ularning natijalarini birlashtirishda xomashyo, reaktor konfiguratsiyasi va energiya hisobining qamrovi saqlanishi kerak.

2. Ishchi hajm, ushlab turish vaqti va organik yuklamaning bog‘liqligi

Uzluksiz yoki sutkalik davriy oziqlantiriladigan reaktor uchun nominal gidravlik ushlab turish vaqti quyidagicha aniqlanadi:

$$\tau = V_r / q_f. \quad (1)$$

Bu yerda τ — gidravlik ushlab turish vaqti, sutka; V_r — suyuqlikning ishchi hajmi, m³; q_f — kiruvchi suspenziyaning hajmiy oqimi, m³/sutka. Gaz bo‘shlig‘i ishchi suyuqlik hajmiga kiritilmaydi. Zichlik o‘zgarishi va gazga aylangan massa dastlabki hajmiy hisobda kichik deb olinadi; batafsil loyiha uchun alohida massa balansi tuziladi.

VS bo‘yicha yuklama quyidagi ifodalar bilan bog‘lanadi:

$$M_{VS} = m_f \cdot w_{TS} \cdot f_{VS}; \quad OLR = M_{VS} / V_r = C_{VS} / \tau. \quad (2)$$

Bu yerda m_f — nam suspenziya massasi, kg/sutka; w_{TS} — quruq modda ulushi; f_{VS} — quruq moddadagi VS ulushi; M_{VS} — kiruvchi VS massasi, kg VS/sutka; C_{VS} — VS konsentratsiyasi, kg VS/m³; OLR — kg VS/(m³·sutka). Demak, konsentratsiya o‘zgarmaganda OLR va τ o‘zaro bog‘liq.

Reaktor hajmi o‘zgarmasdan oziqlantirish oshirilsa, organik yuklama ortadi va ushlab turish vaqti qisqaradi. Suyultirish nasoslashni yengillashtirishi mumkin, biroq bir birlik VS uchun isitiladigan suv massasini oshiradi. Shu sababli ushbu parametrlar kompleks tanlanadi.

3. Kichik hajmli biogaz qurilmalarida metan hosil bo‘lishiga ta’sir etuvchi asosiy omillar

Kichik hajmli biogaz qurilmalarida metan (CH_4) hosil bo‘lishi substrat xususiyatlari, metanogen mikroorganizmlar faolligi va reaktorning texnologik rejimiga bog‘liq. Asosiy boshqariladigan omillar sifatida harorat, pH, C/N nisbati, organik yuklama, ushlab turish vaqti, substrat tarkibi va aralashtirish ko‘rsatiladi [1–4].

Harorat va pH. Metanogen mikroorganizmlar harorat o‘zgarishiga sezgir; mezofil rejimda haroratning barqaror saqlanishi muhim. Metanogenlar neytralga yaqin muhitda faol bo‘lib, adabiyotlarda maqbul pH ko‘pincha 6,8–7,2 oralig‘ida keltiriladi [1–3].

C/N nisbati, organik yuklama va ushlab turish vaqti. C/N nisbatining nomutanosibligi azot yetishmasligi yoki ammiak to‘planishiga olib kelishi mumkin. Organik yuklamaning ortib ketishi uchuvchan yog‘ kislotalari to‘planishiga, ushlab turish vaqtining qisqarishi esa parchalanishning tugallanmasligiga sabab bo‘lishi mumkin [1, 3, 4].

Substrat tarkibi va aralashtirish. Turli organik substratlarni birgalikda anaerob parchalash ozuqa muvozanatini yaxshilashi mumkin. Me’yoriy aralashtirish issiqlik va massa almashinuvini kuchaytiradi, ammo haddan tashqari intensiv aralashtirish qo‘shimcha energiya sarfi va biologik muvozanatga salbiy ta’sir keltirishi mumkin [3–6].

Demak, yuqori metan chiqishi alohida bitta parametr bilan emas, balki harorat, pH, substrat tarkibi, C/N nisbati, organik yuklama, ushlab turish vaqti hamda aralashtirish rejimining o‘zaro muvofiqligi bilan ta’minlanadi.

4. Metan hosil bo‘lishidan foydali energiyaga o‘tish

Ekspluatatsion solishtirma metan chiqishi Y_{CH4} bilan belgilanganda:

$$V_{CH4,N} = M_{VS} \cdot Y_{CH4}; \quad E_g = V_{CH4,N} \cdot H_{L,CH4}. \quad (3)$$

Y_{CH4} birligi Nm^3 CH_4/kg VS, $H_{L,CH4}$ — metanning quyi yonish issiqligi, kWh/Nm^3. E_g gazning kimyoviy energiyasini bildiradi va hali foydali issiqlik yoki elektr energiyasi emas.

Nam gaz o‘lchovi, ideal gaz yaqinlashuvida, quyidagicha keltiriladi:

$$V_N = V_m \cdot [(p_{abs} - p_w)/p_N] \cdot (T_N/T_m). \quad (4)$$

Bu yerda p_{abs} — absolut bosim; p_w — suv bug‘ining parsial bosimi; T_m va T_N — Kelvin shkalasidagi haroratlar. Quruq gaz uchun $p_w = 0$ olinadi. Bosim, namlik va harorat bo‘yicha tuzatishsiz olingan hajmlarni bevosita solishtirish to‘g‘ri emas.

BMP laboratoriya sharoitidagi metan potensialini ifodalaydi [6, 7], ekspluatatsion Y_{CH4} esa ushlab turish vaqti, organik yuklama, aralashtirish va biologik barqarorlik bilan cheklanadi. Energetik loyiha uchun ishlash rejimiga mos ekspluatatsion qiymat zarur.

5. Reaktorning issiqlik balansi

Statsionar holatdagi sutkalik texnologik issiqlik ehtiyoji quyidagicha ifodalanadi:

$$Q_{req} = (1 - \varepsilon) \cdot m_f \cdot c_p \cdot (T_d - T_{in})/3600 + 0{,}024 \cdot \Sigma[U_j A_j (T_d - T_j)] + Q_{aux}. \quad (5)$$

Bu yerda ε — issiqlik qaytarish ulushi; c_p — suspenziyaning solishtirma issiqlik sig‘imi; T_d — reaktor, T_{in} — kirish harorati; U_j va A_j — sirtning issiqlik uzatish koeffitsiyenti hamda maydoni; Q_{aux} — qo‘shimcha termik yo‘qotishlar. 0,024 koeffitsiyenti W ni bir sutkadagi kWh ga o‘tkazadi.

Reaktor tubi, yon devori va qopqog‘i turli muhit bilan chegaralansa, havo va tuproq haroratlari alohida olinadi. Quyosh yoki biologik issiqlik kabi qo‘shimcha kirimlar mavjud bo‘lsa, ular balansda alohida hisobga olinadi.

Yassi, ketma-ket qatlamli devor yaqinlashuvida:

$$U = [1/h_i + \Sigma(\delta_k/\lambda_k) + 1/h_o]^{-1}. \quad (6)$$

Bu yerda h_i va h_o — sirt issiqlik almashinuvi koeffitsiyentlari; δ_k — qatlam qalinligi; λ_k — issiqlik o‘tkazuvchanligi. Real sharoitda namlanish va termik ko‘priklar ideal modeldan og‘ishga olib kelishi mumkin.

Geometrik o‘xshash reaktorlarda $A/V_r \propto V_r^{-1/3}$. Shuning uchun hajm kamaygan sari birlik hajmga to‘g‘ri keluvchi devor issiqlik yo‘qotishi ortadi va kichik qurilmalarda izolyatsiyaning ahamiyati kuchayadi.

6. Sof issiqlik va o‘zini issiqlik bilan ta’minlash mezoni

Biogaz qozonda yoqiladigan variantda, gazning mavjud qismi to‘liq ishlatilsa:

$$Q_{net} = \eta_b \cdot a \cdot E_g - Q_{req}. \quad (7)$$

Bu yerda η_b — qozonning foydali issiqlik samaradorligi; a — ishlab chiqarilgan metanning amalda foydalaniladigan ulushi. $Q_{net} > 0$ bo‘lsa, texnologik ehtiyojdan keyin foydalanish mumkin bo‘lgan issiqlik qoladi.

O‘zini issiqlik bilan ta’minlash ko‘rsatkichi va minimal metan chiqishi:

$$\Psi = Q_{req}/(\eta_b \cdot a \cdot E_g); \quad Y_{min} = Q_{req}/(\eta_b \cdot a \cdot M_{VS} \cdot H_{L,CH4}). \quad (8)$$

$\Psi < 1$ ortiqcha issiqlik mavjudligini, $\Psi = 1$ chegaraviy holatni, $\Psi > 1$ tashqi issiqlik ehtiyojini bildiradi. $Y_{CH4} \geq Y_{min}$ sharti belgilangan rejimda o‘zini issiqlik bilan ta’minlashning zarur mezonidir.

7. Harorat va izolyatsiyani tanlashning chegaraviy shartlari

Bir xil oziqlantirish, ushlab turish vaqti, gazdan foydalanish ulushi va qozon samaradorligida T_1 dan T_2 ga o‘tishning energetik foydasi:

$$\eta_b \cdot a \cdot M_{VS} \cdot H_{L,CH4} \cdot [Y(T_2) - Y(T_1)] > Q_{req}(T_2) - Q_{req}(T_1). \quad (10)$$

Chap tomon qo‘shimcha metandan olinadigan foydali issiqlikni, o‘ng tomon esa qo‘shimcha isitish sarfini ifodalaydi. Demak, “yuqori harorat — yuqori samaradorlik” xulosasi faqat metan chiqishiga qarab chiqarilmaydi [4, 5].

Kiruvchi substrat harorati tashqi havo haroratidan mustaqil parametrdir. Iliq texnologik oqimdan foydalanish imkoniyati bo‘lmagan xo‘jalikda boshqa tajribadagi energetik natijani bevosita kutish asoslanmagan [3].

$$Q_{req} \geq (1 - \varepsilon) \cdot m_f \cdot c_p \cdot (T_d - T_{in})/3600. \quad (11)$$

Ushbu tengsizlik izolyatsiya va rekuperatsiya vazifalarini ajratadi: izolyatsiya tashqi yo‘qotishni, rekuperatsiya esa kiruvchi oqimni isitish yukini kamaytiradi. Universal optimal izolyatsiya qalinligi uchun energetik hisobdan tashqari iqtisodiy va ekspluatatsion omillar ham zarur.

8. Mahalliy sharoitga moslashtirish va natijalar ishonchliligi

Buxoro sharoitiga mos parametrlarni belgilash uchun faqat yillik o‘rtacha harorat yetarli emas. Havo va tuproq haroratining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi, kiruvchi suspenziya harorati, xomashyo tarkibining mavsumiy o‘zgarishi va yordamchi uskunalarning energiya sarfi o‘lchanishi kerak. Shu sababli maqolada muayyan reaktor hajmi, harorat yoki izolyatsiya qalinligi Buxoro uchun universal optimal deb belgilanmaydi.

2-jadval. Energetik asoslash uchun zarur o‘lchovlar va ularning vazifasi

Parametrlar guruhi	Aniqlanadigan kattaliklar	Hisobdagi vazifasi
Xomashyo	Sutkalik massa yoki hajm, zichlik, TS, VS, kirish harorati	OLR, τ, M_{VS} va isitish yukini aniqlash
Gaz	Hajm, metan ulushi, absolut bosim, harorat, namlik	Normal sharoitdagi metan hajmi va kimyoviy energiyani hisoblash
Termik holat	Reaktor, havo va tuproq harorati; isitish konturi sarfi va harorat farqi	Q_{req} va termik modelni tekshirish
Yordamchi uskunalar	Aralashtirgich, nasos va boshqaruvning haqiqiy elektr sarfi	Tizim chegarasidagi elektr ehtiyojini aniqlash
Biologik barqarorlik	pH, ishqoriylik, uchuvchan yog‘ kislotalari, ammoniy azoti	Gaz kamayishini termik yoki biologik sababdan ajratish

Sof issiqlik natijasining ishonchliligi gaz hajmi, metan chiqishi, U koeffitsiyenti, samaradorlik va harorat o‘lchovlariga bog‘liq. Ψ qiymati 1 ga yaqin bo‘lganda o‘lchash noaniqligi xulosaga sezilarli ta’sir qilishi mumkin.

Tajriba ma’lumotlari bo‘lmaganda taxminiy diapazonlar faqat sezgirlik senariysi sifatida berilishi mumkin; ular statistik ishonch oralig‘i o‘rnini bosmaydi.

Modelni tekshirishda kalibrlash va validatsiya ma’lumotlari ajratilishi, rejimlar taqqoslanganda moslashuv davri hamda xomashyo tarkibidagi o‘zgarishlar qayd etilishi kerak.

Tahlilning asosiy cheklovi tanlangan adabiyotlar doirasi va mahalliy validatsiyaning yo‘qligidir. Amaliy jihatdan dastlab massa–energiya balansi tekshirilishi, so‘ng ma’lumot yetarliligiga qarab model murakkablashtirilishi maqsadga muvofiq.

Xulosa. Kichik hajmli biogaz qurilmasining energetik parametrlarini asoslashda reaktor hajmi, organik yuklama va ushlab turish vaqti yagona massa balansi doirasida tanlanishi kerak. Energetik baholashning markaziy ko‘rsatkichi yalpi gaz hajmi emas, balki texnologik ehtiyojlar qoplangandan keyin qoladigan foydali energiyadir.

Harorat rejimini tanlashda qo‘shimcha metanning foydali energiyasi qo‘shimcha isitish sarfidan yuqori bo‘lishi tekshiriladi. Izolyatsiya devor yo‘qotishlarini kamaytiradi, rekuperatsiya esa kiruvchi substratni isitish yukini pasaytiradi; bu yechimlar bir-birini to‘ldiradi.

Adabiyotlar tahliliga ko‘ra, o‘zini issiqlik bilan ta’minlash ko‘rsatkichi Ψ va minimal zarur metan chiqishi Y_{min} parametrlarni dastlabki saralash mezonlari sifatida qo‘llanishi mumkin. Ularning amaliy qiymatlari mahalliy xomashyo va o‘lchangan termik sharoit asosida aniqlanishi lozim.

ADABIYOTLAR:

1. Rennuit C., Sommer S. G. Decision Support for the Construction of Farm-Scale Biogas Digesters in Developing Countries with Cold Seasons. Energies. 2013. Vol. 6, No. 10. P. 5314–5332. https://doi.org/10.3390/en6105314

2. Calise F., Cappiello F. L., Dentice d’Accadia M., Infante A., Vicidomini M. Modeling of the Anaerobic Digestion of Organic Wastes: Integration of Heat Transfer and Biochemical Aspects. Energies. 2020. Vol. 13, No. 11. Article 2702. https://doi.org/10.3390/en13112702

3. Ramos-Suárez J. L., Álvarez-Méndez S. J., Padrón Tejera E., Ritter A., Mata González J. Temperature Control Effect on Cheese Whey Anaerobic Digestion with Low-Cost Tubular Digesters. Processes. 2024. Vol. 12, No. 7. Article 1452. https://doi.org/10.3390/pr12071452

4. Moset V., Poulsen M., Wahid R., Højberg O., Møller H. B. Mesophilic versus thermophilic anaerobic digestion of cattle manure: methane productivity and microbial ecology. Microbial Biotechnology. 2015. Vol. 8, No. 5. P. 787–800. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12271

5. Ahlberg-Eliasson K., Westerholm M., Isaksson S., Schnürer A. Anaerobic Digestion of Animal Manure and Influence of Organic Loading Rate and Temperature on Process Performance, Microbiology, and Methane Emission From Digestates. Frontiers in Energy Research. 2021. Vol. 9. Article 740314. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.740314

6. Holliger C., Alves M., Andrade D., et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. Water Science and Technology. 2016. Vol. 74, No. 11. P. 2515–2522. https://doi.org/10.2166/wst.2016.336

7. Holliger C., Astals S., Fruteau de Laclos H., Hafner S. D., Koch K., Weinrich S. Towards a standardization of biomethane potential tests: A commentary. Water Science and Technology. 2021. Vol. 83, No. 1. P. 247–250. https://doi.org/10.2166/wst.2020.569

8. Batstone D. J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S. V., Pavlostathis S. G., Rozzi A., Sanders W. T. M., Siegrist H., Vavilin V. A. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). Water Science and Technology. 2002. Vol. 45, No. 10. P. 65–73. https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292