КИЧИК ҲАЖМЛИ БИОГАЗ ҚУРИЛМАСИНИНГ ТЕХНИК ПАРАМЕТРЛАРИНИ АСОСЛАШ

Узаков Ориф Ҳамроевич
Бухоро давлат университети "Муҳандислик технологиялари ва қайта тикланувчи энергия манбалари" кафедраси доценти
Олтибойев Шерзод Олим ўғли
Бухоро давлат университети "Муҳандислик технологиялари ва қайта тикланувчи энергия манбалари" кафедраси магистранти
E-mail: sherzodoltıboyev83@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4340-7861

Аннотация. Мақолада қишлоқ хўжалиги ва маиший органик чиқиндиларни анаэроб қайта ишлашга мўлжалланган кичик ҳажмли биогаз қурилмасининг асосий техник параметрларини танлаш ва ўзаро боғлаш усули таклиф этилган. 2024–2026 йиллардаги илмий адабиётлар асосида реактор ҳажми, гидравлик ушланиш вақти (HRT), органик юклама (OLR), ҳарорат режими, қуруқ модда миқдори, аралаштириш, иссиқлик изоляцияси ва газни мониторинг қилиш параметрлари таҳлил қилинди. Ҳисобий намуна сифатида суткасига 0,20 м³ суюлтирилган субстрат қабул қиладиган мезофил қурилма кўриб чиқилди. HRT=30 суткада ишчи ҳажм 6,0 м³, 15% газ бўшлиғини ҳисобга олганда конструктив ҳажм тахминан 7,1 м³ бўлиши аниқланди. Замонавий кичик қурилмалар учун реал вақт мониторинги, қуёш иссиқлиги билан қўллаб-қувватлаш ва IoT/Edge AI воситаларини босқичма-босқич жорий этиш техник ишончлиликни оширувчи йўналиш сифатида асосланди.

Калит сўзлар: биогаз, анаэроб парчаланиш, биореактор, гидравлик ушланиш вақти, органик юклама, метан, мезофил режим, иссиқлик изоляцияси, IoT мониторинг, кичик ҳажмли қурилма, кодигестия.

Аннотация. В статье предложен подход к обоснованию взаимосвязанных технических параметров малогабаритной биогазовой установки для анаэробной переработки сельскохозяйственных и бытовых органических отходов. На основе публикаций 2024–2026 гг. рассмотрены объём реактора, гидравлическое время удерживания, органическая нагрузка, температурный режим, содержание сухого вещества, перемешивание, теплоизоляция и мониторинг газа. Для расчётной подачи 0,20 м³/сут при HRT=30 сут рабочий объём составляет 6,0 м³, а конструктивный объём с 15%-ным газовым пространством — около 7,1 м³. Обоснована целесообразность интеграции солнечного теплоснабжения, датчиков и IoT/Edge AI для повышения устойчивости малых установок.

Ключевые слова: биогаз, анаэробное сбраживание, биореактор, HRT, органическая нагрузка, метан, мезофильный режим, мониторинг, кодигестия.

Abstract. The paper proposes an engineering approach for substantiating the interrelated technical parameters of a small-scale biogas plant intended for anaerobic treatment of agricultural and household organic wastes. Recent studies from 2024–2026 are synthesized with emphasis on reactor volume, hydraulic retention time (HRT), organic loading rate (OLR), temperature, total solids, mixing, thermal insulation and gas monitoring. For a design feed rate of 0.20 m^3 day^{-1} and HRT of 30 days, the calculated working volume is 6.0 m^3; allowing a 15% gas headspace gives a total structural volume of approximately 7.1 m^3. Solar-assisted thermal control, low-cost sensing, IoT and Edge-AI monitoring are identified as promising measures for improving reliability and methane productivity of decentralized digesters.

Keywords: biogas, anaerobic digestion, biodigester, hydraulic retention time, organic loading rate, methane, mesophilic regime, IoT monitoring, codigestion.

КИРИШ.

Органик чиқиндилардан биогаз олиш технологияси бир вақтнинг ўзида қайта тикланувчи энергия ишлаб чиқариш, чиқиндиларни зарарсизлантириш ва озуқа моддаларига бой дигестат олиш имконини беради. Кичик ҳажмли қурилмалар фермер хўжаликлари, чорвачилик объектлари ва марказлашган газ таъминоти чекланган ҳудудлар учун айниқса аҳамиятли. Бироқ амалиётда қурилманинг ҳажми, ҳарорат режими, HRT, OLR, аралаштириш ва назорат тизими бир-бирига мос танланмаса, кислота тўпланиши, метан ҳосил бўлишининг пасайиши, кўпикланиш, газ сизиб чиқиши ёки реакторнинг қисқа вақтда ишдан чиқиши кузатилиши мумкин [1–3].

2024 йилги тизимли таҳлил кичик биогаз қурилмаларида реал вақт мониторинги, аралаштириш механизми ва ҳароратни бошқаришни лойиҳалаш босқичидаёқ ҳисобга олиш зарурлигини кўрсатади [1]. 2025 йилда маҳаллий материаллардан тайёрланган кичик реакторлар бўйича тажрибалар ҳарорат ва HRTнинг газ унумдорлигига кучли таъсирини тасдиқлади; муайян тажриба шароитида 45 °C ва 25 сутка HRT энг юқори жамланган биогаз ҳосилини берган, бироқ муаллифлар бу натижанинг назорат қилинмайдиган дала шароитларига тўғридан-тўғри кўчирилиши чекланганини қайд этган [2]. 2025 йилги шарҳ эса ҳарорат, умумий қуруқ модда, HRT ва субстрат

ISSN 3030-3907

таркибини алоҳида эмас, гидролиз ва метаногенез мувозанати нуқтаи назаридан биргаликда бошқариш зарурлигини таъкидлайди [3].

Ўзбекистон шароити учун 2025-йилда чоп этилган тадқиқотларда кичик биогаз қурилмаларининг иссиқлик-техник ва геометрик параметрларини оптималлаштириш, шунингдек қуёш энергияси ҳисобига биореакторнинг иссиқлик режимини барқарорлаштириш масалалари кўриб чиқилган [4, 5]. 2025–2026 йилларда эса арзон датчиклар, қуёш фотоэлектр таъминоти, IoT ва Edge AI технологиялари метан, CO_2, H_2S, босим ва ҳароратни узлуксиз кузатиш ҳамда метан ҳосил бўлиш тезлигини прогнозлаш учун амалий воситага айлана бошлади [6–8]. Шу сабабли кичик қурилмани фақат реактор ҳажми билан эмас, балки «реактор–иссиқлик–гидравлика–газ–мониторинг» ягона тизими сифатида асослаш долзарбдир.

ТАДҚИҚОТ МАҚСАДИ ВА УСУЛЛАРИ.

Тадқиқотнинг мақсади — замонавий илмий натижаларни умумлаштириш ва инженерлик ҳисоблари асосида суткалик хомашё сарфига мос кичик ҳажмли биогаз қурилмасининг конструктив ва технологик параметрларини асослаш. Ишда адабиётларни қиёсий таҳлил қилиш, моддий баланс, гидравлик ҳисоб, органик юклама бўйича текширув, геометрик ўлчамлаш ва соддалаштирилган иссиқлик баланси усулларидан фойдаланилди. Ҳисобий мисол тажриба натижаси эмас, балки лойиҳалаш алгоритмини кўрсатувчи инженерлик сценарийси ҳисобланади.

Бошланғич шарт сифатида суткалик суюлтирилган субстрат сарфи $Q=0{,}20$ м³/сут қабул қилинди. Субстрат чорва чиқиндиси ва сув аралашмаси бўлиб, умумий қуруқ модда миқдори TS≈8–10% атрофида сақланиши кўзда тутилади. Мезофил режим учун мақсадли ҳарорат 35–38 °C, pH эса 6,8–7,5 диапазонида ушлаб турилиши тавсия этилади. Аниқ ишчи қийматлар маҳаллий хомашёнинг BMP (biochemical methane potential) синови ва мавсумий ҳарорат маълумотлари билан текширилиши шарт.

ISSN 3030-3907



1-расм. Кичик ҳажмли биогаз қурилмасининг функционал тузилиши

РЕАКТОР ҲАЖМИ ВА УНДА СУБСТРАТНИНГ САҚЛАНИШ ВАҚТИНИ АСОСЛАШ.

Узлуксиз ёки ярим узлуксиз ишлайдиган реактор учун ишчи ҳажм гидравлик ушланиш вақти орқали аниқланади:

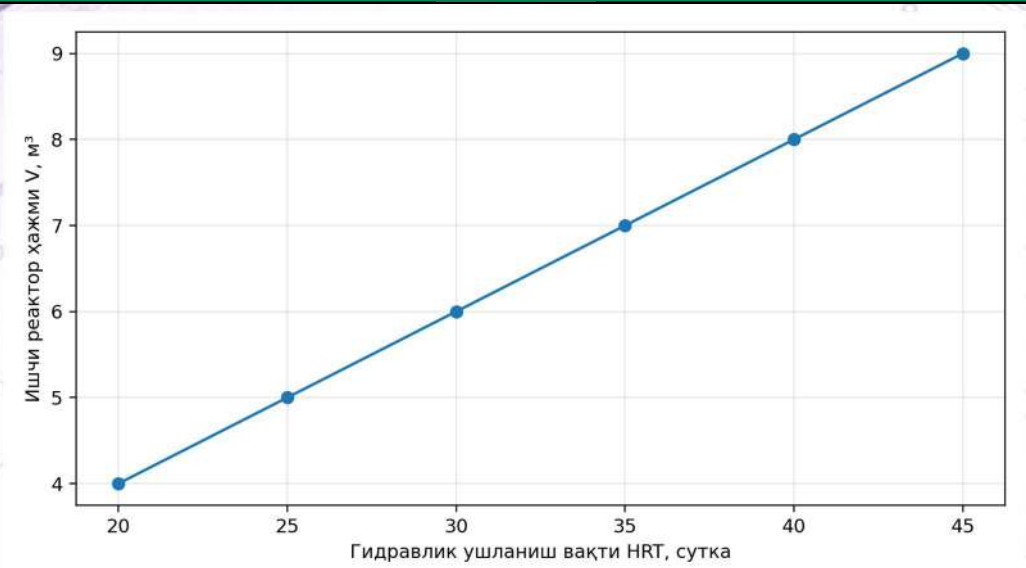
$$V_r = Q \cdot HRT \quad (1)$$

бу ерда V_r — реакторнинг ишчи суюқлик ҳажми, м³; Q — суткалик субстрат сарфи, м³/сут; HRT — реакторда субстратнинг сақланиш вақти, сутка. Q=0,20 м³/сут ва HRT=30 сутка бўлганда V_r=6,0 м³. Газ тўпланиши, кўпик ва сатҳ тебранишлари учун 10–20% эркин ҳажм қолдирилади. 15% газ бўшлиғи қабул қилинса, умумий конструктив ҳажм қуйидагича бўлади:

$$V_t = V_r / (1 - f_9) = 6,0 / 0,85 \approx 7,06 \text{ м}^3 \quad (2)$$

бу ерда V_t — реакторнинг тўлиқ геометрик ҳажми, м³; f_9 — газ бўшлиғининг улуши. Демак, ҳисобий қурилма учун 7,0–7,2 м³ конструктив ҳажм мақбул бошланғич қиймат ҳисобланади. HRTни асоссиз қисқартириш метаноген микроорганизмларнинг ювилиб кетишига ва учувчан ёғ кислоталари тўпланишига олиб келиши мумкин; жуда узун HRT эса реактор ҳажми ва капитал харажатни оширади. Шунинг учун HRT ҳарорат, субстратнинг парчаланувчанлиги ва OLR билан биргаликда танланади [2,3].

ISSN 3030-3907



2-расм. Q=0,20 м³/сут бўлганда HRTнинг реактор ишчи ҳажмига таъсири

ОРГАНИК ЮКЛАМА ВА СУБСТРАТ ТАРКИБИ.

Органик юклама реакторга бир суткада киритилаётган учувчан қуруқ модданинг ишчи ҳажмга нисбати билан ифодаланади:

$OLR = m_{vs} / V_r$ (3)

бу ерда OLR — органик юклама, кг VS/(м³·сут); m_{vs} — суткада киритиладиган учувчан қуруқ модда массаси, кг VS/сут; V_r — реактор ишчи ҳажми, м³. Масалан, суткалик 200 кг суюлтирилган субстратда TS=9% ва VS/TS=0,80 бўлса, m_{vs}=200·0,09·0,80=14,4 кг VS/сут; V_r=6 м³ учун OLR=2,4 кг VS/(м³·сут) бўлади. Бу қиймат мезофил қишлоқ хўжалиги субстратлари учун эҳтиёткор ишга тушириш нуқтаси сифатида қабул қилиниши мумкин, аммо аниқ чегара субстратга боғлиқ.

2025 йилги озиқ-овқат чиқиндилари тадқиқотида C:N=20–30 диапазони метан конверсияси учун самарали бўлган, C:N=25 ҳолатида эса юқори метан ҳосили қайд этилган; OLR ортиб кетганда аммиак стресси ва жараён беқарорлиги кучайган [9]. Бу натижа барча субстратларга универсал меъёр эмас, лекин кичик қурилмада C:N нисбатини ва юкламани биргаликда назорат қилиш зарурлигини кўрсатади. Амалиётда чорва чиқиндисини углеродга бой ўсимлик қолдиқлари ёки озиқ-овқат чиқиндилари билан кодигестия қилиш(биогаз ишлаб чиқаришда **икки ёки ундан ортиқ турдаги органик хомашёни биргаликда анаэроб парчалаш** жараёни.) C:N мувозанатини яхшилаши мумкин.

ҲАРОРАТ РЕЖИМИ ВА ИССИҚЛИК ҲИМОЯСИ.

Анаэроб парчаланиш тезлиги ҳароратга сезгир. Кичик қурилмаларда ташқи муҳит таъсири ҳажмга нисбатан катта сирт майдони туфайли кучлироқ сезилади. Шу сабабли барқарор мезофил режим (одатда 35–38 °C атрофи)

ISSN 3030-3907

эксплуатацион соддалик ва микробиологик барқарорлик ўртасида амалий компромисс ҳисобланади. 2025 йилги шарҳ юқори ҳарорат, юқори TS ва қисқа HRT бир вақтда гидролизни ҳаддан ташқари тезлаштириб, кислоталаниш ёки аммиак ингибицияси хавфини ошириши мумкинлигини кўрсатади [3].

Реактор девори орқали иссиқлик йўқотилиши соддалаштирилган ҳолда қуйидаги ифода билан баҳоланади:

$$\dot{Q}_{loss} = U \cdot A \cdot (T_r - T_a) \quad (4)$$

бу ерда $\dot{Q}_{loss}$ — иссиқлик йўқотиш қуввати, W; U — конструкциянинг умумий иссиқлик узатиш коэффициенти, W/(м²·K); A — ташқи иссиқлик алмашинув юзаси, м²; T_r — реактор ичи ҳарорати, °C; T_a — ташқи ҳаво ҳарорати, °C. Изоляция қалинлиги ортган сари U камаяди ва қишки иссиқлик сарфи пасаяди. Бухоро ва Ўзбекистоннинг кескин континентал шароитида реакторни ерга қисман кўмиш, минерал пахта/ППУ каби изоляция ва қуёш коллектори билан паст ҳароратли иситишни бирлаштириш мақсадга мувофиқ. Ўзбекистон шароитига бағишланган тадқиқотлар ҳам қуёш энергияси ва иссиқлик аккумуляцияси ёрдамида биореактор ҳароратини барқарорлаштиришни истиқболли деб кўрсатади [4,5].

ГЕОМЕТРИК ПАРАМЕТРЛАР ВА АРАЛАШТИРИШ.

Кичик ҳажмли цилиндрик реактор учун диаметр D ва ишчи баландлик H танланганда сирт/ҳажм нисбати, аралаштириш имконияти, чўкма тўпланиши ва қурилиш технологияси ҳисобга олинади. Вертикал цилиндр учун ҳажм:

$$V = \pi D^2 H / 4 \quad (5)$$

бу ерда V — цилиндр ҳажми, м³; D — ички диаметр, м; H — цилиндрик қисм баландлиги, м. $V_r \approx 7{,}1$ м³ учун D=2,0 м қабул қилинса, идеал цилиндрик баландлик H≈2,26 м чиқади. Амалда конуссимон туб, газ қопқоғи ва хизмат кўрсатиш зонаси туфайли геометрия қайта аниқланади. 2025 йилги Ўзбекистон тадқиқотида каттароқ 30 м³ реактор учун D≈2,8 м ва L≈4,9 м каби оптималлаштирилган ўлчамлар келтирилган; бу маълумотни 7 м³ қурилмага тўғридан-тўғри масштаблаш тўғри эмас, аммо иссиқлик йўқотишлари ва геометрияни биргаликда оптималлаштириш зарурлигини тасдиқлайди [4].

Аралаштиришнинг вазифаси субстратни бир жинсли қилиш, микроорганизмлар ва озуқа моддаларининг контакт юзасини ошириш, қатламланиш ва қалин қобиқ ҳосил бўлишини камайтиришдан иборат. Кичик қурилма учун паст тезликли механик аралаштиргич ёки газ-рециркуляцион аралаштириш қўлланиши мумкин. Доимий юқори тезликли аралаштириш энергия сарфини оширади ва микроб агрегатларига салбий таъсир қилиши мумкин; шунинг учун интервалли режим мақбул.

ISSN 3030-3907

ГАЗ УНУМДОРЛИГИ ВА ЭНЕРГЕТИК КЎРСАТКИЧЛАР.

Метаннинг назарий ёки кутилган суткалик ҳажми учувчан қуруқ модда сарфи ва махсус метан ҳосили орқали баҳоланади:

$$V_{CH_4} = m_{vs} \cdot Y_{CH_4} \quad (6)$$

бу ерда V_{CH_4} — суткалик метан ҳажми, м³/сут; m_{vs} — реакторга киритилган VS массаси, кг/сут; Y_{CH_4} — муайян субстратнинг амалий махсус метан ҳосили, м³ CH_4/кг VS. Y_{CH_4} қиймати хомашё турига жуда боғлиқ бўлгани учун уни адабиётдан кўр-кўрона қабул қилиш ўрнига BMP синови билан аниқлаш тавсия этилади. 2025-йилда кичик сузувчи барабанли реакторда озиқ-овқат чиқиндисидан 248,5 L/kgTS умумий биогаз ва айрим кунларда тахминан 72% максимал метан улуши қайд этилган; муаллифлар ташқи иситишсиз пастроқ ҳарорат газ ҳосилини чеклаганини таъкидлайди [10].

Биогаз таркиби одатда метан ва карбонат ангидриддан иборат бўлиб, H_2S, сув буғи ва бошқа аралашмалар кам миқдорда учрайди. UNIDO материалларида кичик тизимлар учун метан улуши одатда 50–75% оралиғида келтирилади [11]. 2026 йилги интеграл методологик ёндашувда эса $CH_4 \geq 50\%$ техник валидация учун минимал, >60% эса исталган ишчи мезон сифатида ишлатилган [12]. Шунинг учун газ сифатини фақат умумий ҳажм билан эмас, CH_4 улуши билан ҳам баҳолаш лозим.

ЗАМОНАВИЙ МОНИТОРИНГ: IoT, ҚУЁШ PV ВА EDGE AI.

Кичик қурилмаларда энг муҳим янгиликлардан бири — арзон сенсорлар ва микроконтроллерлар асосида узлуксиз мониторингнинг жорий этилишидир. 2025-йилда қуёш фотоэлектр манбаидан таъминланадиган IoT тизими CH_4, CO_2, H_2S, ҳарорат, босим ва газ сарфини масофадан кузатиш учун синовдан ўтказилган; метан ўлчовида ±2,3% ва ҳароратда ±1,5% атрофида оғиш қайд этилган, CO_2 ва H_2S сенсорларида эса аниқлик муаммолари сақланган [6]. Бу кичик қурилмада сенсорларни даврий калибровка қилиш зарурлигини кўрсатади.

2026-йилда SmartBioGas-PIoT ёндашуви ESP32 микроконтроллерида термодинамик қонунлар ва TinyMLни бирлаштириб, метан ҳосил бўлиш тезлигини қурилманинг ўзида прогнозлашни намойиш этди; Random Forest модели учун R^2=0,9824 натижа келтирилган [7]. Шу йилги AI бўйича шарҳда сунъий нейрон тармоқлар, SVM, Random Forest, гибрид моделлар ва soft-sensorлар анаэроб парчаланишда эрта огоҳлантириш, аномалияни аниқлаш ва адаптив бошқарув учун асосий ривожланиш йўналиши сифатида кўрсатилган [8]. 2026 йил сентябрда чоп этилган мультисенсор платформа тадқиқоти ҳам CH_4, CO_2, H_2S, O_2 ва ҳарорат маълумотларини биргаликда таҳлил қилишга урғу беради [13].

ISSN 3030-3907

Амалиёт учун икки босқичли ечим мақбул: биринчи босқичда T, pH, босим ва газ сарфи каби ишончли ва арзон параметрларни узлуксиз ўлчаш; иккинчи босқичда $CH_4/CO_2/H_2S$ сенсорлари ва прогнозлаш алгоритмларини қўшиш. Электрон қисмлар биогаз билан тўғридан-тўғри контактдан ҳимояланган, портлаш хавфи бўлган зонадан ташқарида жойлаштирилган бўлиши шарт.

ТАВСИЯ ЭТИЛАЁТГАН ТЕХНИК ПАРАМЕТРЛАР.

1-жадвал.

0,20 м³/сут хомашё сарфи учун кичик биогаз қурилмасининг ҳисобий параметрлари

Параметр	**Ҳисобий/тавсия қиймати**	**Асослаш**
Суткалик субстрат сарфи Q	0,20 м³/сут	Ҳисобий сценарий
HRT	30 сутка	Мезофил кичик реактор учун бошланғич лойиҳа қиймати
Ишчи ҳажм V_r	6,0 м³	$V_r=Q\cdot HRT$
Конструктив ҳажм V_t	≈7,1 м³	15% газ бўшлиғи билан
Ҳарорат	35–38 °C	Барқарор мезофил режим
pH	6,8–7,5	Метаногенез учун мақбул нейтрал муҳит
TS	≈8–10%	Насослаш ва аралаштиришга қулай нам ферментация
Ҳисобий OLR	≈2,4 кг VS/(м³·сут)	TS=9%, VS/TS=0,80 сценарийси
C:N	20–30 атрофи	Хомашёга қараб ко-дигестия билан созланади
Газ назорати	сарф + CH_4 (кейин CO_2/H_2S)	Унумдорлик ва сифатни бирга баҳолаш
Иссиқлик ҳимояси	изоляция + қуёш иссиқлиги	Қишки иссиқлик йўқотишини камайтириш

ISSN 3030-3907

Жадвалдаги қийматлар тайёр стандарт эмас, балки дастлабки инженерлик лойиҳаси учун ўзаро мослаштирилган параметрлардир. Реал объектда субстратнинг намлиги, VS улуши, BMP, ташқи ҳарорат, сув таъминоти ва фойдаланувчининг газга бўлган суткалик эҳтиёжи ўлчангач, параметрлар қайта ҳисобланиши лозим.

ТЕХНИК-ИҚТИСОДИЙ ВА ЭКСПЛУАТАЦИОН МУЛОҲАЗАЛАР

Кичик биогаз қурилмасининг самарадорлиги фақат максимал газ ҳосили билан белгиланмайди. Капитал харажат, иситиш ва аралаштириш учун ўз эҳтиёж энергияси, техник хизмат кўрсатиш, газни тозалаш, дигестатдан фойдаланиш ва қурилманинг йил давомида ишлаш коэффициенти ҳам ҳисобга олиниши керак. 2025- йилги кичик реакторлар тадқиқотида маҳаллий материаллардан фойдаланиш инвестицияни камайтириши ва муайян шароитларда харажатларни бир йилдан кам муддатда қоплаш мумкинлиги кўрсатилган, аммо бу иқтисодий натижа маҳаллий ёқилғи нархи ва эксплуатация шароитига боғлиқ [2].

Қурилманинг ишончлилиги учун киришда йирик аралашмаларни ушлаб қолувчи панжара, авариявий босим чиқариш клапани, конденсат тутгич, H_2Sни камайтириш фильтри, қайтиш алангасидан ҳимоя, газ сизишини текшириш ва электр жиҳозларини хавфли зонадан ажратиш кўзда тутилиши керак. Дигестатни санитар талабларга мувофиқ сақлаш ва агрономик меъёр асосида қўллаш зарур.

ХУЛОСА

1. Кичик ҳажмли биогаз қурилмасининг асосий параметрлари — HRT, OLR, ҳарорат, TS, C:N, реактор геометрияси ва аралаштириш — бир-биридан мустақил эмас; улар гидролиз ва метаногенез мувозанатини таъминлайдиган ягона тизим сифатида танланиши керак.

2. Q=0,20 м³/сут ва HRT=30 сутка учун ишчи реактор ҳажми 6,0 м³, 15% газ бўшлиғи билан умумий конструктив ҳажм тахминан 7,1 м³ деб асосланди. TS=9% ва VS/TS=0,80 ҳисобий сценарийсида OLR≈2,4 кг VS/(м³·сут) бўлади.

3. Таҳлил натижалари кичик ҳажмли биогаз қурилмасини асослашда ягона “энг яхши” ҳарорат ёки HRT мавжуд эмаслигини кўрсатади. Масалан, 45 °C ва 25 сутка HRT муайян Уганда тажрибасида юқори натижа берган [2], лекин 2025 йилги фундаментал шарҳ юқори ҳарорат ва қисқа HRTнинг бошқа параметрлар билан номувофиқлиги кислоталаниш хавфини оширишини кўрсатади [3]. Шу боис Ўзбекистонда ташқи энергия сарфини чеклаш мақсадида барқарор мезофил режим, етарли HRT ва яхши изоляция кўп ҳолларда ишончлироқ инженерлик ечими бўлиши мумкин.

4. Илмий янгилик нуқтаи назаридан мақолада кичик қурилма параметрлари реактор ҳажмига боғланган ҳолда эмас, балки ўзаро чекловлар

ISSN 3030-3907

тизими сифатида шакллантирилди: Q→HRT→V_r; TS ва VS→OLR; T ва изоляция→иссиқлик талаби; газ сарфи ва CH_4→энергетик самара; датчиклар→эксплуатацион барқарорлик. Бундай ёндашув кейинги экспериментал ишда оптималлаштириш мезонларини аниқ белгилаш имконини беради.

5. Келгуси тадқиқотларда Бухоро вилояти шароитида камида бир йиллик ташқи ҳарорат профили, маҳаллий чорва чиқиндиларининг BMP кўрсаткичлари, реактор иссиқлик йўқотишлари ва газ таркибининг мавсумий ўзгариши экспериментал ўлчаниши лозим. Шу маълумотлар асосида техник-иқтисодий оптималлаштириш ва рақамли “soft sensor” модели ишлаб чиқиш мақсадга мувофиқ.

6. Ўзбекистоннинг мавсумий ҳарорат шароитида 35–38 °C мезофил режимни сифатли изоляция ва қуёш иссиқлик манбаи билан қўллаб-қувватлаш кичик қурилма учун амалий ечим ҳисобланади; аниқ изоляция қалинлиги иссиқлик баланси асосида танланиши шарт.

7. 2025–2026 йиллардаги фан-техника ривожи кичик биогаз тизимларини T, pH, босим, газ сарфи ва CH_4 сенсорлари, кейинчалик IoT ва Edge AI билан жиҳозлаш томон йўналган. Бу воситалар жараён беқарорлигини эрта аниқлаш ва техник хизматни режалаштириш имконини беради.

8. Таклиф этилган параметрлар дастлабки лойиҳалаш учун мўлжалланган; ОАК журналига экспериментал мақола сифатида тақдим этишдан олдин маҳаллий субстратлар учун BMP, реал газ ҳосили, CH_4 улуши ва иссиқлик сарфи тажрибада валидация қилиниши мақсадга мувофиқ.

ФОЙДАЛАНИЛГАН АДАБИЁТЛАР

1. Issahaku M., Derkyi N.S.A., Kemausuor F. A systematic review of the design considerations for the operation and maintenance of small-scale biogas digesters. Heliyon. 2024;10(1):e24019. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24019.

2. Design and performance evaluation of small-scale biogas digesters using locally available materials in rural Uganda. Renewable Energy. 2025;246:122994. DOI: 10.1016/j.renene.2025.122994.

3. A review of temperature and key parameters influencing the hydrolysis-methanogenesis balance in anaerobic digestion. Fuel. 2025;394:134927. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134927.

4. Sharipov M.Z., Majitov J.A., Ergashev Sh.H., Shodiyev E.B., Narzullayeva Z.M. Substitution of thermal-technical and geometric parameters of a small-scale biogas plant. Eurasian Physical Technical Journal. 2025;22(3):84–90. DOI: 10.31489/2025N3/84-90.

ISSN 3030-3907

5. Optimization of thermal processes in solar biogas plant. Eurasian Physical Technical Journal. 2025. DOI: 10.31489/2025N2/48-59.
6. Issahaku M., Derkyi N.S.A., Kemausuor F. An assessment of a solar PV-powered IoT monitoring system for small-scale biogas digesters. Discover Internet of Things. 2025;5:122. DOI: 10.1007/s43926-025-00223-4.
7. SmartBioGas-PIoT: Physics-informed edge AI and TinyML for real-time monitoring and methane rate prediction in anaerobic digesters. Results in Engineering. 2026;30:110657. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.110657.
8. Xu M., Monson C., Kpodo J., Long F., Liu H., Liu Y., Liao W. Artificial intelligence for anaerobic digestion: advancing sustainable biogas production. Energy Advances. 2026. DOI: 10.1039/D6YA00053C.
9. Investigating the influence of feedstock feeding frequency and carbon-to-nitrogen ratio on anaerobic digestion of food waste in lab-scale mesophilic reactors. Renewable Energy. 2025;254:123731. DOI: 10.1016/j.renene.2025.123731.
10. Biogas production from different food waste using small-scale floating-drum-type anaerobic digester. Bioprocess and Biosystems Engineering. 2025. DOI: 10.1007/s00449-025-03239-w.
11. UNIDO. Small-Scale Biogas for Clean Cooking — A Cost-Effective Technology to Tackle Climate Change and Achieve SDGs. Technical brief. United Nations Industrial Development Organization.
12. Integrated Methodological Framework for Small-Scale Anaerobic Biodigesters: Traceability Between Design, Operation, and Sustainability. AgriEngineering. 2026;8(7):285.
13. An Internet of Things-Based Multisensor Platform for Biogas Monitoring and Experimental Data Analysis. Inventions. 2026;11(5):92. DOI: 10.3390/inventions11050092.