ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCE

CENTRAL ASIAN SCIENTIFIC JOURNAL
ISSN 3135-3061
2026. №4 (32), 2-том. 629–635 б.
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.24492156
Журнал сайты: https://cajournal.kz

ӘОЖ 004.7:628.15

ESP32 МИКРОКОНТРОЛЛЕРІ НЕГІЗІНДЕ СУ АҒУЫН АНЫҚТАЙТЫН ЖӘНЕ МОБИЛЬДІ ҚОСЫМША АРҚЫЛЫ ХАБАРЛАЙТЫН ЖҮЙЕНІҢ АРХИТЕКТУРАСЫ МЕН АЛГОРИТМІН ӘЗІРЛЕУ

Б.К. Боранбаев
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Боранбаев Бекбол Кенжеғалиұлы — 2-курс магистранты, «IoT-та программаланатын электроника» білім беру бағдарламасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

Ғылыми жетекші: Сыздыков Арман Базарбаевич — философия докторы (PhD), «Ғарыштық техника және технологиялар» білім беру бағдарламаларының жетекшісі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті.

© Б.К. Боранбаев, 2026

Аңдатпа: Мақаланың мақсаты – арзан, ашық құрамдас бөліктерден тұратын, су ағуын нақты уақыт режимінде анықтайтын және пайдаланушыға мобильді қосымша арқылы хабарлайтын жүйенің архитектурасы мен алгоритмін әзірлеу. Жұмыста жүйелік жобалау, өлшенетін гидравликалық шамаларды математикалық сипаттау және ережеге негізделген шешім қабылдау әдістері қолданылды. Шығын, қысым және су датчиктері мен электромагниттік клапанды басқаратын ESP32 құрылғысынан, MQTT брокерінен, серверлік сервистен және мобильді қосымшадан тұратын үш деңгейлі архитектура ұсынылды. Анықтау алгоритмі су датчигін, апаттық шығын мен қысымның күрт төмендеуін, ұзақ тұрақты ағысты, түнгі минималды шығынды және қысымды ұстау тестін біріктіретін бес ережеден тұрады, ал апаттық жағдайлар бұлтқа тәуелсіз, құрылғының өзінде өңделеді. Сондай-ақ MQTT тақырыптарының құрылымы, мобильді қосымшаның функциялары және жүйені зертханалық стендте тексеру әдістемесі ұсынылды.

Түйін сөздер: су ағуын анықтау, заттар интернеті, ESP32, шығын датчигі, қысым датчигі, MQTT, мобильді қосымша, электромагниттік клапан.

Кіріспе

Сумен жабдықтау жүйелеріндегі ағулар әлемдік деңгейдегі мәселе болып табылады: жыл сайын жоғалатын кіріс әкелмейтін судың көлемі шамамен 126 млрд м³-ге бағаланады [1]. Қазақстанда сумен жабдықтау желілерінің едәуір бөлігі тозған, ал 2025 жылы ағулар мен есепке алынбаған шығындар 180,7 млн м³ құраған [2]. Магистральдық желілерден бөлек, тұрғын үйлердің ішкі желілеріндегі ағулар да маңызды: жертөледегі құбырдың жарылуы немесе сантехниканың ақауы бірнеше сағат ішінде көршілес пәтерлер мен ғимарат конструкцияларына зиян келтіреді.

Ағуды анықтау әдістерін талдау үздіксіз автоматты бақылау үшін шығын балансы, түнгі минималды шығын (Minimum Night Flow, MNF) және қысымды бақылау әдістерінің ең қолайлы екенін көрсетеді [3], [4]. Су балансы мен автоматтандырылған MNF талдауын біріктіру ағуды нақты уақыт режимінде анықтауға мүмкіндік береді [5], ал сымсыз датчиктер желісі операторсыз бақылауды қамтамасыз етеді [6]. Нарықтағы тұрмыстық шешімдер де

осы принциптерді пайдаланады, бірақ олар қымбат, деректерді өндірушінің бұлтында сақтайды және қазақ тіліндегі интерфейсті қолдамайды.

Зерттеудің мақсаты – ESP32 микроконтроллері, стандартты датчиктер және ашық хаттамалар негізінде су ағуын анықтайтын, суды автоматты түрде жабатын және пайдаланушыға мобильді қосымша арқылы хабарлайтын жүйенің архитектурасы мен анықтау алгоритмін әзірлеу. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: жүйеге қойылатын талаптарды нақтылау және құрамдас бөліктерді таңдау; жүйенің архитектурасын әзірлеу; өлшеу моделі мен ағуды анықтау алгоритмін құру; деректер алмасу хаттамасының құрылымын және мобильді қосымшаның функцияларын анықтау; эксперименттік тексеру әдістемесін ұсыну.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Жобалау кезінде жүйеге келесі талаптар қойылды: ағуды үздіксіз анықтау; апаттық жағдайда бұлт пен интернет байланысына тәуелсіз түрде суды автоматты жабу; бірнеше датчик деректерін біріктіру арқылы жалған дабылдарды азайту; кең таралған арзан құрамдас бөліктерді және ашық хаттамаларды пайдалану; ғимарат ішінде Wi-Fi арқылы жұмыс істеу және болашақта LPWAN технологияларына (LoRaWAN, NB-IoT) көшу мүмкіндігін сақтау [7]; қазақ және орыс тілдеріндегі мобильді қосымша.

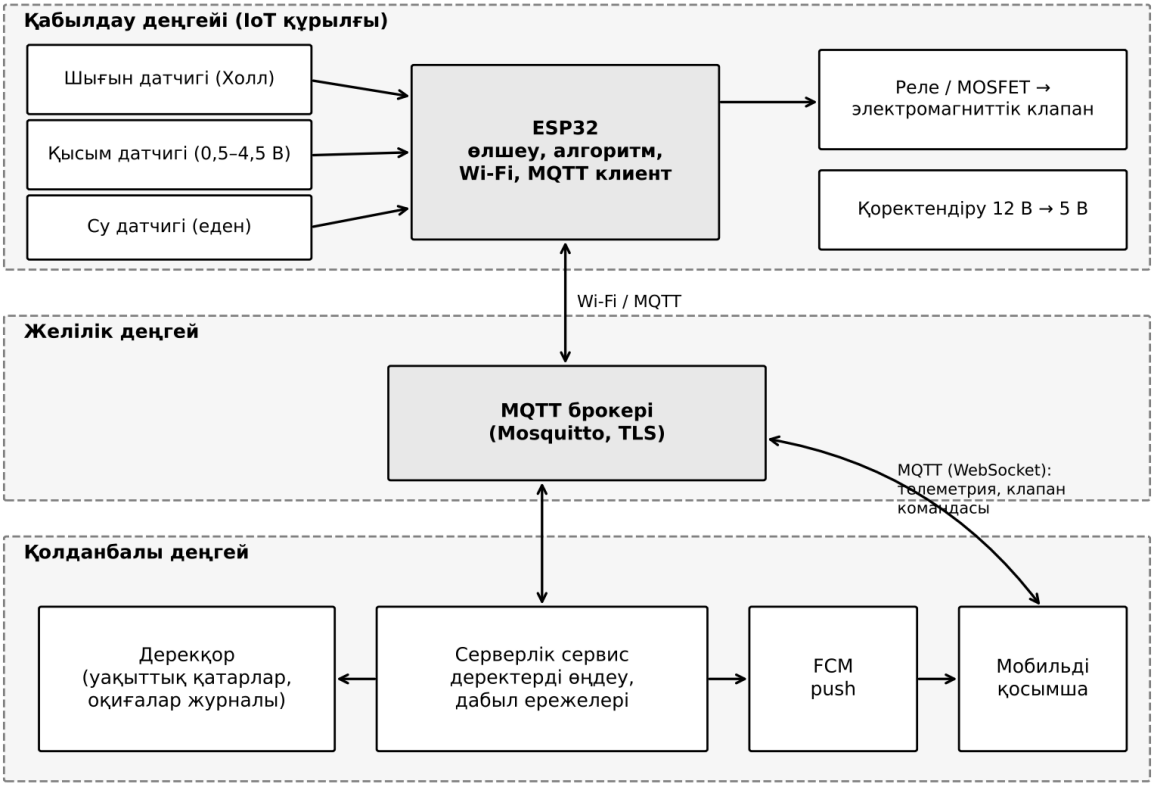
Зерттеуде жүйелік жобалау (IoT жүйесінің үш деңгейлі архитектурасы [8], [9]), өлшенетін шамаларды математикалық сипаттау, ережеге негізделген шешім қабылдау және блок-схема түріндегі алгоритмдік модельдеу әдістері қолданылды. Құрамдас бөліктер қолжетімділік, құн, ESP32-мен үйлесімділік және сипаттамалардың бақыланатын желіге сәйкестігі критерийлері бойынша таңдалды (1-кесте).

Кесте 1 – Жүйенің негізгі құрамдас бөліктері

Құрамдас бөлік	Ұсынылған нұсқа	Атқаратын қызметі
Микроконтроллер	ESP32 (кіріктірілген Wi-Fi және Bluetooth) [10]	Өлшеу, алгоритмді орындау, MQTT арқылы деректер алмасу
Шығын датчигі	Холл эффектісіне негізделген турбиналық датчик (мысалы, YF-S201, ½ дюйм)	Су шығынын импульстер жиілігі арқылы өлшеу
Қысым датчигі	Аналогтық түрлендіргіш, 0–1,2 МПа, шығысы 0,5–4,5 В	Желідегі қысымды және оның өзгеру жылдамдығын бақылау
Су датчигі	Еденге орнатылатын контактілі датчик	Төгілген суды тікелей анықтау
Атқарушы құрылғы	Қалыпты жабық электромагниттік клапан, 12 В; реле немесе MOSFET кілті	Суды автоматты және қашықтан жабу
Қоректендіру	12 В блок, 12 В → 5 В төмендеткіш түрлендіргіш	Клапан мен электрониканы қоректендіру

Нәтижелер және талқылау

Жүйенің архитектурасы. Ұсынылған жүйе IoT жүйелеріне тән үш деңгейден тұрады (1-сурет). Қабылдау деңгейінде ESP32 микроконтроллері шығын, қысым және су датчиктерінен деректерді оқып, анықтау алгоритмін орындайды және клапанды басқарады. Желілік деңгейде құрылғы Wi-Fi арқылы MQTT брокеріне (Mosquitto [11]) қосылып, деректерді TLS шифрлауымен жібереді. Қолданбалы деңгейде серверлік сервис телеметрияны дерекқорға жазады, ұзақ мерзімді талдауды орындайды және Firebase Cloud Messaging (FCM) қызметі арқылы мобильді қосымшаға push-хабарлама жібереді [12]. Мобильді қосымша брокерге WebSocket арқылы MQTT клиенті ретінде қосылып, нақты уақыттағы мәндерді алады және клапанды басқару командасын жібереді.



Сурет 1 - Ағуды анықтау жүйесінің архитектурасы

Архитектураның маңызды ерекшелігі – шешім қабылдаудың екі деңгейге бөлінуі. Жылдам әрекетті талап ететін апаттық ережелер құрылғының өзінде (edge-деңгейде) орындалады, сондықтан интернет байланысы үзілген жағдайда да су жабылады. Ал тарихи деректерді қажет ететін талдау (тұтыну профилін құру, шектерді бейімдеу, есептер) сервер жағында жүргізіледі.

Өлшеу моделі. Холл датчигінің шығысындағы импульстер жиілігі f (Гц) шығынға пропорционал. YF-S201 типті датчик үшін өндіруші f = 7,5·Q қатынасын көрсетеді, мұндағы Q – шығын, л/мин; жалпы түрде:

$$Q = \frac{f}{K} \tag{1}$$

мұндағы K – датчиктің түрлендіру коэффициенті, Гц/(л/мин), ол стендте калибрлеу арқылы нақтыланады. Импульстер ESP32-нің аппараттық импульс санауышымен (PCNT) Δt = 1 с интервалында саналады. Өткен су көлемі шығынды интегралдау арқылы есептеледі:

$$V = \Sigma_i \frac{Q_i \cdot \Delta t}{60} \tag{2}$$

мұндағы V – көлем, л; Δt – секундпен берілген өлшеу интервалы. Қысым датчигінің U шығыс кернеуі бойынша қысым:

$$P = P_{max} \cdot \frac{U - 0{,}5}{4{,}0} \tag{3}$$

мұндағы P_{max} = 1,2 МПа – датчиктің өлшеу шегі. ESP32 аналогтық кірісінің кернеуі шамамен 3,3 В-тан аспауы тиіс болғандықтан, датчик сигналы кернеу бөлгіш арқылы беріледі (мысалы, 10 кОм / 20 кОм резисторларымен 4,5 В шамамен 3,0 В-қа дейін төмендейді), ал АЦП сызықсыздығы калибрлеу кестесімен түзетіледі. Шуды азайту үшін Q және P мәндеріне N = 5 өлшемдік жылжымалы орта сүзгісі қолданылады. Қысымның өзгеру жылдамдығы соңғы τ секундтағы айырма арқылы бағаланады:

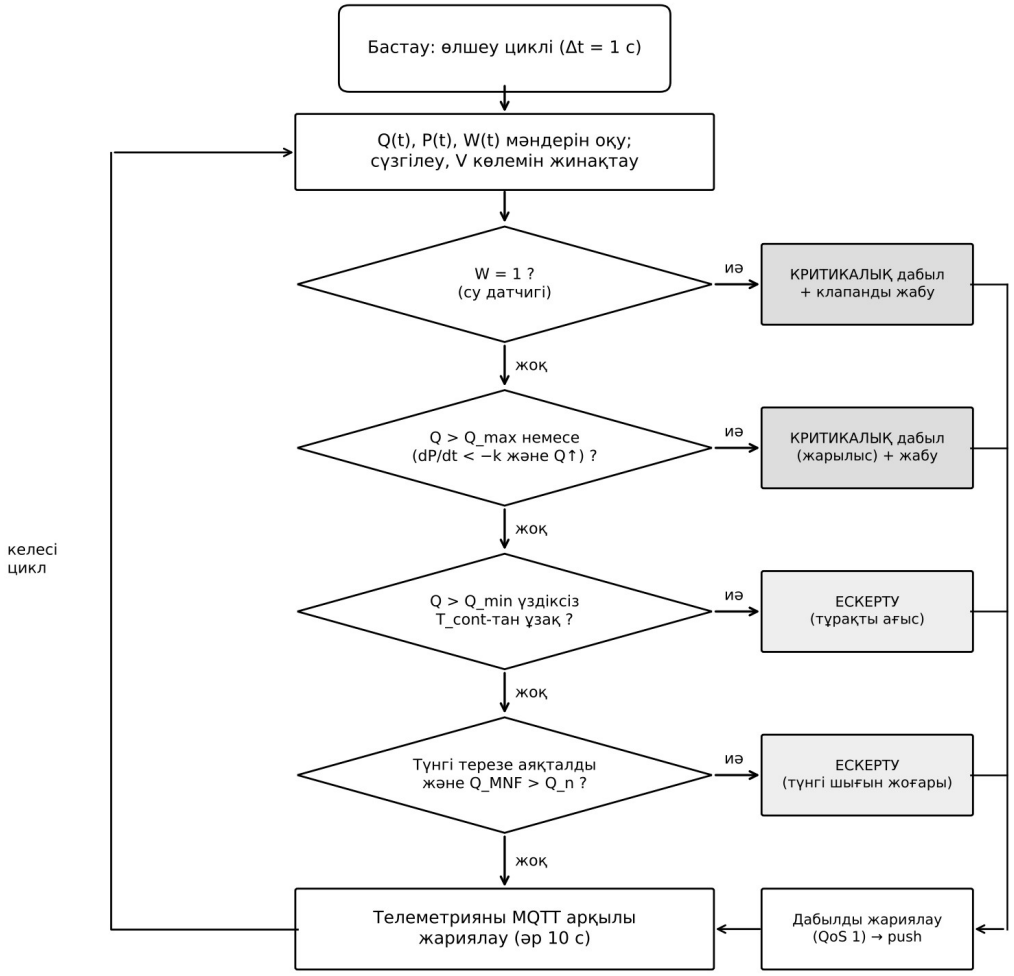
$$\frac{dP}{dt} \approx \frac{P(t) - P(t-\tau)}{\tau} \tag{4}$$

Ағуды анықтау алгоритмі. Алгоритм ағудың әр түріне сәйкес келетін бес ережені біріктіреді, ал дабылдар екі деңгейге бөлінеді: суды автоматты жабумен қатар жүретін «критикалық» дабыл және пайдаланушының шешімін талап ететін «ескерту». Ережелер мен олардың бастапқы параметрлері 2-кестеде, ал құрылғыда орындалатын негізгі цикл 2-суретте көрсетілген.

Кесте 2 – Ағуды анықтау ережелері және бастапқы параметрлер

Ереже	Шарт	Анықталатын жағдай	Әрекет
R1. Су датчигі	W = 1	Төгілген су (кез келген көздің ағуы)	Критикалық дабыл, клапанды жабу
R2. Апаттық шығын / қысым	$Q > Q_{max}$ (25 л/мин) немесе $dP/dt < –k$ кезінде Q өседі	Құбыр жарылуы	Критикалық дабыл, клапанды жабу
R3. Тұрақты ағыс	$Q > Q_{min}$ үздіксіз T_{cont}-тан (60 мин) ұзақ	Ашық қалған кран, бачоктың ағуы, орташа ағу	Ескерту
R4. Түнгі минималды шығын	02:00–04:00 аралығындағы орташа $Q_{MNF} > Q_n$	Жасырын тұрақты ағу	Ескерту
R5. Қысымды ұстау тесті	Түнде клапан жабылғаннан кейін 5 мин ішінде қысымның төмендеуі $\Delta P > \Delta P_{th}$	Шығын датчигі сезбейтін микроағу	Ескерту

Ережелердің шекті мәндері бастапқы болып табылады: олар мобильді қосымша арқылы бапталады және стендтегі эксперимент нәтижелері бойынша калибрленеді. R3 ережесінде T_{cont} уақытын тұтынушы профиліне қарай таңдау маңызды, себебі ванна толтыру немесе суару сияқты заңды ұзақ тұтыну жалған ескертуге әкелуі мүмкін.



Сурет 2 - ESP32 құрылғысында орындалатын ағуды анықтау циклінің блок-схемасы

R5 ережесі шығын датчигінің шектеуін жою үшін енгізілді. Турбиналық Холл датчиктері шамамен 1 л/мин-тан төмен шығынды сенімді өлшей алмайды, сондықтан тамшылау сияқты микроағулар R3 және R4 ережелерімен анықталмауы мүмкін. Тұтыну жоқ түнгі уақытта клапан қысқа мерзімге жабылып, оның артындағы желі учаскесіндегі қысым бақыланады: герметикалық желіде қысым тұрақты болады, ал ағу болса, ол біртіндеп төмендейді. Тест кезінде шығын пайда болса (біреу кранды ашса), ол тоқтатылып, клапан қайта ашылады. Осылайша бір қысым датчигі арзан шығын датчигінің сезімталдық шегін толықтырады.

R2 ережесінде шығын мен қысымды бірге талдау жалған дабылдарды азайтуға бағытталған: қысымның төмендеуі сыртқы желідегі өзгерістерден де болуы мүмкін, бірақ ол шығынның күрт артуымен қатар жүрсе, бұл құрылғыдан кейінгі учаскедегі жарылыстың белгісі. Бұл тәсіл бір параметрге сүйену жалған дабылдарға әкелетіні туралы әдебиеттегі тұжырымға сәйкес келеді [4].

Деректер алмасу хаттамасы. Құрылғы мен жүйенің басқа бөліктері арасындағы деректер алмасу MQTT хаттамасы бойынша ұйымдастырылады [13]. Тақырыптардың құрылымы мен хабарламаларды жеткізу сапасының (QoS) деңгейлері 3-кестеде берілген.

Кесте 3 – MQTT тақырыптарының құрылымы

Тақырып	Бағыты	QoS	Мазмұны
leak/{id}/telemetry	Құрылғы → брокер	0	Q, P, V, клапан күйі (әр 10 с)
leak/{id}/alarm	Құрылғы → брокер	1	Дабыл түрі (R1–R5), деңгейі, уақыты, мәндер
leak/{id}/status	Құрылғы → брокер	1, retained	online/offline (LWT арқылы)
leak/{id}/cmd/valve	Қосымша → құрылғы	1	open / close командасы
leak/{id}/config	Сервер → құрылғы	1, retained	Ережелердің шекті мәндері

Телеметрия үшін QoS 0 жеткілікті, себебі жеке хабарламаның жоғалуы маңызды емес, ал дабыл мен басқару командалары үшін QoS 1 жеткізуге кепілдік береді. Last Will and Testament (LWT) механизмі құрылғымен байланыс үзілгенде брокердің өзі «offline» күйін жариялауына мүмкіндік береді, сондықтан пайдаланушы құрылғының істен шыққанын да біледі. Хабарламалар JSON форматында беріледі, мысалы: {"q": 2.4, "p": 0.31, "v": 1532.7, "valve": "open", "ts": 1764000000}. Брокерге қосылу логин мен құпиясөз арқылы және TLS шифрлауымен жүзеге асырылады.

Серверлік бөлік және мобильді қосымша. Серверлік сервис брокердегі тақырыптарға жазылып, телеметрияны уақыттық қатарларды сақтауға арналған дерекқорға жазады, дабыл оқиғаларын журналға тіркейді және дабыл түскен кезде FCM арқылы push-хабарлама жібереді. Мобильді қосымшаны Android және iOS үшін бір кодтық база негізінде Flutter құралымен әзірлеу ұсынылады. Қосымша келесі экрандардан тұрады: құрылғының ағымдағы күйі (шығын, қысым, клапан, байланыс); шығын мен қысымның тарихы мен тәуліктік тұтыну графиктері; дабылдар журналы; клапанды қашықтан басқару; ережелердің шекті мәндерін және түнгі терезені баптау. Интерфейс қазақ және орыс тілдерінде жасалады.

Жауап беру уақыты. Ағудың басталуынан пайдаланушының хабарлама алуына дейінгі уақыт келесі құраушылардың қосындысы ретінде анықталады:

$$t_{alarm} = t_{ан} + t_{mqtt} + t_{serv} + t_{push} \quad (5)$$

мұндағы $t_{ан}$ – ережені іске қосуға қажетті уақыт; t_{mqtt} – хабарламаның брокерге жеткізілуі; t_{serv} – серверде өңдеу; t_{push} – push-хабарламаның жеткізілуі. R1 және R2 ережелері үшін $t_{ан}$ өлшеу циклімен шектеледі (бірнеше секунд), ал клапанның жабылуы желілік кешігуге тәуелсіз. Жобалық талап ретінде критикалық дабылды пайдаланушыға 10 с ішінде жеткізу белгіленді; нақты мәндер эксперимент кезінде өлшенеді.

Эксперименттік тексеру әдістемесі. Жүйені тексеру үшін зертханалық стенд ұсынылады: су қоймасы, сорғы немесе су құбыры желісіне қосылыс, шығын және қысым датчиктері, электромагниттік клапан, сондай-ақ ағуды имитациялайтын, ашылу дәрежесі

әртүрлі шаровой крандар мен тамшылатқыш саптама. Сынақ сценарийлері: еденге су төгу (R1); кранды толық ашу арқылы жарылысты имитациялау (R2); 60 минуттан ұзақ орташа ағыс (R3); түнгі терезедегі әлсіз тұрақты ағу (R4); 1 л/мин-тан төмен тамшылау (R5); ағусыз қалыпты тұтыну (жалған дабылдарды бағалау үшін). Әр сценарий кемінде 20 рет қайталанады. Тиімділік көрсеткіштері ретінде анықтау деңгейі TPR = TP/(TP + FN), жалған дабыл деңгейі FPR = FP/(FP + TN), (5) формуласы бойынша жауап беру уақыты және шығын өлшеуінің эталонды көлеммен салыстырғандағы салыстырмалы қателігі қолданылады.

Талқылау. Коммерциялық тұрмыстық шешімдермен салыстырғанда ұсынылған жүйенің артықшылықтары: кең таралған арзан құрамдас бөліктерге негізделуі, ашық хаттамаларды пайдалануы және деректердің пайдаланушының бақылауындағы серверде сақталуы, апаттық жағдайда бұлтқа тәуелсіз әрекет етуі, сондай-ақ қазақ тіліндегі интерфейс. Жүйенің шектеулері де бар: ағудың нақты орны емес, оның бақыланатын учаскеде бар екені анықталады; турбиналық датчиктің дәлдігі шектеулі, сондықтан коммерциялық есептеуге арналмаған; Wi-Fi байланысы ғимарат ішімен шектеледі. Соңғы шектеуді архитектураны өзгертпей, тек желілік деңгейде LoRaWAN модулін қосу арқылы жоюға болады.

Қорытынды

Мақалада ESP32 микроконтроллері негізінде су ағуын анықтайтын және мобильді қосымша арқылы хабарлайтын жүйенің архитектурасы мен алгоритмі әзірленді. Үш деңгейлі архитектура датчиктер мен клапанды басқаратын құрылғыны, MQTT брокерін, серверлік сервисті және мобильді қосымшаны біріктіреді, ал шешім қабылдау құрылғы мен сервер арасында бөлінген, бұл интернет байланысы болмаған жағдайда да апаттық жабуды қамтамасыз етеді. Анықтау алгоритмі су датчигін, апаттық шығын мен қысымның төмендеуін, ұзақ тұрақты ағысты, түнгі минималды шығынды және қысымды ұстау тестін біріктіретін бес ережеден тұрады; соңғы ереже арзан шығын датчигі сезбейтін микроағуларды анықтауға мүмкіндік береді. MQTT тақырыптарының құрылымы, мобильді қосымшаның функциялары және жүйені тексеру әдістемесі ұсынылды. Зерттеудің келесі кезеңі – прототипті жасау, ережелердің шекті мәндерін калибрлеу және ұсынылған әдістеме бойынша анықтау дәлдігі мен жауап беру уақытын эксперименттік бағалау.

Әдебиеттер тізімі:

1. Liemberger R., Wyatt A. Quantifying the global non-revenue water problem // Water Supply. – 2019. – Vol. 19, No. 3. – P. 831–837. – DOI: 10.2166/ws.2018.129.

2. Утечки воды в Казахстане сократились почти на треть за год // Kazinform. – URL: https://www.inform.kz/ru/utechki-vodi-v-kazahstane-sokratilis-pochti-na-tret-za-god-2c13a412 (дата обращения: 15.11.2026).

3. Puust R., Kapelan Z., Savic D.A., Koppel T. A review of methods for leakage management in pipe networks // Urban Water Journal. – 2010. – Vol. 7, No. 1. – P. 25–45. – DOI: 10.1080/15730621003610878.

4. Pérez R., Puig V., Pascual J., et al. Pressure sensor distribution for leak detection in Barcelona water distribution network // Water Science and Technology: Water Supply. – 2009. – Vol. 9, No. 6. – P. 715–721. – DOI: 10.2166/ws.2009.372.

5. Farah E., Shahrour I. Leakage detection using smart water system: combination of water balance and automated minimum night flow // Water Resources Management. – 2017. – Vol. 31, No. 15. – P. 4821–4833. – DOI: 10.1007/s11269-017-1780-9.

6. Sadeghioon A.M., Metje N., Chapman D.N., Anthony C.J. SmartPipes: smart wireless sensor networks for leak detection in water pipelines // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2014. – Vol. 3, No. 1. – P. 64–78. – DOI: 10.3390/jsan3010064.

7. Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment // ICT Express. – 2019. – Vol. 5, No. 1. – P. 1–7. – DOI: 10.1016/j.icte.2017.12.005.

8. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions // Future Generation Computer Systems. – 2013. – Vol. 29, No. 7. – P. 1645–1660. – DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010.

9. Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of Things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 17, No. 4. – P. 2347–2376. – DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095.

10. ESP32 Series Datasheet. – Espressif Systems. – URL: https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents (дата обращения: 23.11.2026).

11. Light R.A. Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol // Journal of Open Source Software. – 2017. – Vol. 2, No. 13. – P. 265. – DOI: 10.21105/joss.00265.

12. Firebase Cloud Messaging. – Google. – URL: https://firebase.google.com/docs/cloud-messaging (дата обращения: 23.11.2026).

13. MQTT Version 5.0: OASIS Standard. – OASIS, 2019.