ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCE

CENTRAL ASIAN SCIENTIFIC JOURNAL
ISSN 3135-3061
2026. №4 (32), 2-том. 623–628 б.
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.24491944
Журнал сайты: https://cajournal.kz

ӘОЖ 628.15:004.7

СУМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ АҒУДЫ АНЫҚТАУ ӘДІСТЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ ЖӘНЕ IOT НЕГІЗІНДЕГІ ҮЗДІКСІЗ БАҚЫЛАУ ЖҮЙЕСІНЕ ҚОЙЫЛАТЫН ТАЛАПТАР

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 – сумен жабдықтау желілеріндегі ағуды анықтау әдістерін салыстырып, заттар интернеті (IoT) негізіндегі үздіксіз бақылауға ең қолайлы тәсілдерді анықтау. Зерттеуде ғылыми-техникалық әдебиеттерді жүйелі талдау, салыстыру және жалпылау әдістері қолданылды, ал әдістер ағу орнын анықтау мүмкіндігі, үздіксіз бақылауға жарамдылығы, құны, маманға және ауа райына тәуелділігі бойынша бағаланды. Акустикалық әдістер, инфрақызыл термография, георадар және қашықтықтан зондтау негізінен мерзімдік тексеруге арналғаны, ал шығын балансы, түнгі минималды шығын және қысымды бақылау әдістері IoT құрылғыларында үздіксіз іске асыруға ең қолайлы екені көрсетілді. Сымсыз байланыс технологиялары мен MQTT хаттамасы ағуды бақылау міндеті тұрғысынан салыстырылды. Нәтижесінде қатаң континенттік климат жағдайындағы тұрғын үйлер мен шағын нысандарға арналған арзан ағуды бақылау жүйесіне қойылатын алты талап тұжырымдалды.

Түйін сөздер: су ағуы, сумен жабдықтау желісі, кіріс әкелмейтін су, заттар интернеті, шығын датчигі, түнгі минималды шығын, MQTT, үздіксіз бақылау.

Кіріспе

Сумен жабдықтау жүйелерінде желіге берілген судың бір бөлігі тұтынушыға жетпей жоғалады. Халықаралық бағалау бойынша әлемде жыл сайын шамамен 126 млрд м³ кіріс әкелмейтін су (Non-Revenue Water, NRW) жоғалады, ал оның экономикалық құны жылына 39 млрд АҚШ долларына бағаланады [1]. Бұл көлемнің едәуір бөлігін құбырлардағы ағулар мен апаттар құрайды.

Қазақстанда мәселе ерекше өзекті. 2025 жылғы ресми деректер бойынша сумен жабдықтау желілерінің жалпы ұзындығы 112 мың км-ден асады, оның шамамен 22,9 мың км-і тозған; сол жылы ағулар мен есепке алынбаған шығындар 180,7 млн м³ (желіге берілген судың 6,8 %-ы) құраған, ал жүйелерде 1 376 апат тіркелген [2]. Шығындардың өткен жылмен салыстырғанда азаюы оң үрдіс болғанымен, тозған желілердің ауқымы ағуды ерте анықтайтын құралдардың қажеттілігін сақтап отыр.

Астана сияқты қатаң континенттік климаттағы қалаларда топырақтың терең қатуы, маусымдық температура айырмасы және гидравликалық соққылар құбырлардың тозуын

жеделдетеді [3]. Жер астындағы ағу көбіне бетке шыққанға дейін ұзақ уақыт байқалмайды, ал тұрғын үйлердің ішкі желілеріндегі ағу (жертөледегі құбыр, жылыту жүйесі, сантехника) мүлікке зиян келтіргеннен кейін ғана анықталады.

Заттар интернеті (Internet of Things, IoT) технологияларының дамуы арзан датчиктер мен сымсыз байланыс арқылы желі параметрлерін тәулік бойы бақылауға мүмкіндік береді [4]. Алайда ағуды анықтау әдістері алуан түрлі, және олардың қайсысы IoT құрылғысында іске асыруға жарамды екені, сондай-ақ жергілікті жағдайда мұндай жүйеге қандай талаптар қойылуы керектігі әдебиетте жеткілікті жүйеленбеген.

Зерттеудің мақсаты – ағуды анықтау әдістерін бірыңғай критерийлер бойынша салыстырып, IoT негізіндегі үздіксіз бақылау үшін ең қолайлы тәсілдерді анықтау және Қазақстан жағдайына бейімделген ағуды бақылау жүйесіне қойылатын талаптарды тұжырымдау.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Зерттеудің материалы ретінде ағуды анықтау әдістеріне арналған шолу мақалалары, рецензияланған журналдардағы эксперименттік зерттеулер, IoT архитектурасы мен байланыс технологиялары бойынша жұмыстар, байланыс хаттамаларының стандарттары және Қазақстанның сумен жабдықтау саласы бойынша ресми статистика қолданылды [1–20].

Әдістерді салыстыру үшін келесі критерийлер таңдалды: 1) әрекет ету принципі; 2) ағудың бар-жоғын ғана емес, оның орнын анықтау мүмкіндігі; 3) үздіксіз автоматты бақылауға жарамдылығы; 4) жабдық пен қызмет көрсетудің салыстырмалы құны; 5) білікті операторға тәуелділігі; 6) ауа райы мен маусымға тәуелділігі. Талдау әдебиеттерді жүйелеу, салыстыру және жалпылау арқылы жүргізілді, ал әр критерий бойынша бағалау дереккөздерде келтірілген эксперименттік нәтижелерге негізделді.

Нәтижелер және талқылау

Су шығынының құрылымы. Халықаралық су қауымдастығының (IWA) су балансы әдістемесі бойынша жүйеге берілген су мен тұтынушыларға есептелген су арасындағы айырма кіріс әкелмейтін су деп аталады және екі топқа бөлінеді: нақты (физикалық) шығындар, яғни құбырлардағы, қосылыстардағы және резервуарлардағы ағулар мен апаттар, және көрінетін (коммерциялық) шығындар, яғни есептеу құралдарының қателігі мен рұқсатсыз қосылыстар [5]. Техникалық құралдармен анықталатын және жойылатын шығындар – нақты шығындар, сондықтан бұл мақалада солар қарастырылады.

Ағудың негізгі себептеріне металл құбырлардың коррозиясы, материалдың ескіруі, қысымның күрт өзгеруі, топырақтың қозғалысы және монтаждау ақаулары жатады [3], [6]. Температураның маусымдық өзгеруі мен топырақтың қатып-еруі құбыр түйіспелеріне қосымша механикалық жүктеме түсіреді, бұл қыс мезгілінде апаттардың көбеюімен байланысты [3].

Ағуды анықтау әдістерінің жіктелуі. Әдебиетте ағуды анықтау әдістері екі үлкен топқа бөлінеді: желіні тікелей тексеруге негізделген аппараттық әдістер және өлшенген гидравликалық параметрлерді талдауға негізделген бағдарламалық әдістер [6]. Бұл жіктеу 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1 - Су ағуын анықтау әдістерінің жіктелуі

Акустикалық әдістер қысыммен шыққан су тудыратын дыбыс пен дірілді тыңдау құрылғылары, гидрофондар және шу корреляторлары арқылы тіркеуге негізделген. Олар ағу орнын жоғары дәлдікпен көрсете алады, бірақ пластик құбырларда дыбыс жылдам өшетіндіктен тиімділігі төмендейді [7]. Сигналды нейрондық желімен өңдеу жалған дабылдарды азайтып, анықтау деңгейін 92,5 %-ға дейін жеткізгені көрсетілген [8], алайда әдіс қала шуына сезімтал және тәжірибелі операторды талап етеді.

Инфрақызыл термография ағып жатқан судың айналасындағы топырақ температурасының өзгеруін тіркейді. Далалық зерттеулерде әдіс ағулардың 59 %-ын сенімді анықтаған [9], ал оның тиімділігі көктем мен күзде жоғары, жазғы ыстықта және қарлы қыста төмен екені анықталған [10]. Бұл Қазақстанның климаты үшін елеулі шектеу.

Георадар (GPR) топыраққа электромагниттік толқын жіберіп, ағудан туындаған ылғалдылық аномалиясын тіркейді. Георадар мен ИҚ-түсірілімді біріктіру ағу орнын 2,9–5,6 % қателікпен анықтауға мүмкіндік берген [11]. Әдіс кез келген құбыр материалына жарамды, бірақ баяу, қымбат және мерзімдік тексеруге ғана арналған. *Қашықтықтан зондтау* спутниктік немесе ұшқышсыз аппарат суреттеріндегі өсімдік индекстері мен топырақ ылғалдылығын талдап, үлкен аумақтарды қамтиды, бірақ орынды анықтау дәлдігі шектеулі [12].

Қысымды бақылау әдістері ағу кезінде желі учаскесіндегі қысымның төмендеуін тіркеуге негізделген. Өлшенген қысымды гидравликалық модельмен салыстыру және датчиктерді оңтайлы орналастыру ағудың ықтимал аймағын анықтауға мүмкіндік береді [13]. Әдістің әлсіз жағы – қысымға тұтыну режимі мен сорғылардың жұмысы да әсер етеді, сондықтан бір ғана қысым датчигіне сүйену жалған дабылдарға әкеледі.

Шығын балансы және түнгі минималды шығын (Minimum Night Flow, MNF) әдісі аймаққа кірген және одан есептелген су көлемін салыстыруға, сондай-ақ тұтыну ең төмен болатын түнгі сағаттардағы тұрақты шығынды талдауға негізделген. Түнгі уақытта тіркелетін тұрақты шығынның едәуір бөлігі ағуға сәйкес келеді. Су балансы мен автоматтандырылған MNF талдауын біріктіру ағуды нақты уақыт режимінде анықтауға мүмкіндік бергені көрсетілген [14]. Бұл әдістің маңызды артықшылығы – ол тек шығын датчиктерінің деректерін қажет етеді, сондықтан IoT құрылғыларына оңай бейімделеді.

Біріктірілген тәсілдер бірнеше көздің деректерін үйлестіреді. Мысалы, қысым, шығын және қалдық хлор датчиктерінің деректерін геоақпараттық жүйеде біріктіріп, ағудың ықтимал аймағын автоматты түрде анықтау, ал нақты орнын ИҚ-термографиямен растау ұсынылған [15]. Бұл жұмыстар бір параметрдің жеткіліксіз екенін және деректерді біріктіру анықтаудың сенімділігін арттыратынын көрсетеді. Әдістерді салыстыру нәтижелері 1-кестеде жинақталған.

Кесте 1 – Ағуды анықтау әдістерін салыстыру

Әдіс	Ағу орнын анықтауы	Үздіксіз бақылауға жарамдылығы	Құны	Маман мен ауа райына тәуелділігі	Дереккөз
Акустикалық	Дәл	Ішінара (тұрақты логгерлер)	Орташа	Оператор қажет, шуға сезімтал	[7], [8]
ИҚ-термография	Аймақ	Жоқ	Орташа	Маусымға тәуелді	[9], [10]
Георадар (GPR)	Дәл	Жоқ	Жоғары	Оператор қажет	[11]
Қашықтықтан зондтау	Шамамен	Жоқ	Жоғары	Ауа райына тәуелді	[12]
Қысымды бақылау	Аймақ	Иә	Төмен	Тәуелсіз, жалған дабыл ықтимал	[13]
Шығын балансы, MNF	Аймақ	Иә	Төмен	Тәуелсіз	[14]
Біріктірілген	Аймақ / дәл	Иә	Орташа–жоғары	Тәуелсіз, күрделі	[15]

1-кестеден көрініп тұрғандай, ағу орнын дәл көрсететін әдістер (акустика, георадар) жабдық пен маманды қажет етеді және мерзімдік тексеруге арналған. Ал үздіксіз автоматты бақылауға жарамды әдістер (шығын балансы, MNF, қысымды бақылау) ағудың нақты нүктесін емес, оның бар екенін және аймағын анықтайды. Тұрғын үй немесе жеке нысан деңгейінде бұл шектеу аса маңызды емес: бақыланатын желі қысқа болғандықтан, ағудың бар екенін тез білу және суды уақытылы жабу басты міндет болып табылады.

IoT негізіндегі шешімдер. IoT жүйелері әдетте үш деңгейлі архитектура түрінде сипатталады: физикалық параметрлерді өлшейтін датчиктер мен микроконтроллерден тұратын қабылдау деңгейі, деректерді жеткізетін желілік деңгей және деректерді сақтап, талдап, пайдаланушыға ұсынатын қолданбалы деңгей [4], [16]. Пластик құбырлардағы қысымның салыстырмалы өзгерісін сымсыз датчиктер желісімен өлшеу операторсыз үздіксіз бақылаудың мүмкін екенін көрсетті [17], ал машиналық оқыту әдістері (тірек векторлар әдісі, нейрондық желілер) қысым деректері бойынша ағуды анықтау сапасын арттыруға қолданылады [8], [18].

Нарықтағы тұрмыстық шешімдер (мысалы, Flo by Moen, Phyn Plus, LeakBot) шығын, қысым немесе құбыр бетінің температурасы бойынша ағуды анықтап, пайдаланушыға мобильді қосымша арқылы хабарлайды, ал кейбіреулері суды автоматты түрде жабады. Алайда мұндай шешімдер, әдетте, қымбат, деректер өндірушінің бұлтында сақталатын жабық экожүйеге негізделген, қазақ тіліндегі интерфейсі жоқ және Қазақстан нарығында ресми түрде кең таралмаған.

Байланыс технологиялары мен хаттамалар. Байланыс технологиясын таңдау құрылғының орналасуына, қоректену тәсіліне және деректер көлеміне байланысты. Ағуды бақылау міндеті тұрғысынан негізгі технологиялардың салыстыруы 2-кестеде берілген.

Кесте 2 – IoT сымсыз байланыс технологияларын ағуды бақылау міндеті бойынша салыстыру

Технология	Әрекет ету қашықтығы	Энергия тұтынуы	Ағуды бақылаудағы қолайлы сценарий
Wi-Fi	Ондаған метр	Жоғары	Ғимарат ішіндегі, желіден қоректенетін құрылғы
Bluetooth Low Energy	Ондаған метр	Өте төмен	Смартфон арқылы жергілікті баптау
LoRaWAN	Қалада ~5 км, ашық жерде ~20 км-ге дейін	Өте төмен	Құдықтардағы, батареямен жұмыс істейтін датчиктер
NB-IoT	Қалада ~1 км, ашық жерде ~10 км-ге дейін	Төмен	Оператор желісі бар жердегі коммуналдық есептегіштер

LoRaWAN және NB-IoT сипаттамалары [19] бойынша, Wi-Fi мен BLE үшін типтік мәндер келтірілген. Әлсіз байланыс арнасы мен шектеулі ресурстар жағдайында қолданбалы деңгейде MQTT хаттамасы кең тараған: ол «жариялау/жазылу» моделіне негізделген, тақырып жүктемесі аз және хабарламаны жеткізудің үш сапа деңгейін (QoS 0, 1, 2) қолдайды [20]. Бұл қасиет ағу туралы дабыл сияқты маңызды хабарламалардың жеткізілуіне кепілдік беру үшін маңызды.

Ағуды бақылау жүйесіне қойылатын талаптар. Жүргізілген салыстырмалы талдау негізінде тұрғын үйлерге, мүлік иелері бірлестіктеріне және шағын өндірістік нысандарға арналған IoT жүйесіне келесі талаптарды тұжырымдауға болады:

1) *Анықтау әдісі.* Негізгі әдіс ретінде шығынды үздіксіз өлшеу (тұрақты ағысты және түнгі минималды шығынды талдау) қолданылуы тиіс, ал жалған дабылдарды азайту үшін ол қысым және тікелей су датчиктерінің деректерімен толықтырылуы керек.

2) *Әрекет ету жылдамдығы.* Құбыр жарылуы сияқты апаттық жағдайлар құрылғының өзінде, бұлтқа тәуелсіз анықталып, суды электромагниттік клапанмен автоматты түрде жабу қарастырылуы қажет; баяу ағулар туралы ескерту кешіктірілуі мүмкін.

3) *Құн және ашықтық.* Жүйе кең таралған арзан құрамдас бөліктерден (ESP32 сияқты кіріктірілген Wi-Fi модулі бар микроконтроллер, стандартты датчиктер) және ашық хаттамалардан құрастырылуы, ал деректер пайдаланушының бақылауында болуы тиіс.

4) *Байланыс.* Ғимарат ішінде Wi-Fi және MQTT жеткілікті; жерасты құдықтары мен қашықтағы нысандар үшін LoRaWAN немесе NB-IoT-ке көшу мүмкіндігі архитектурада алдын ала қарастырылуы керек.

5) *Пайдаланушы интерфейсі.* Мобильді қосымша push-хабарлама, шығын мен қысым тарихының графиктері, клапанды қашықтан басқару және дабыл шектерін баптау функцияларын қамтып, қазақ және орыс тілдерінде жұмыс істеуі тиіс.

6) *Климаттық бейімделу.* Құрылғы жылытылатын үй-жайда орналасуы немесе қату қаупі бар жерлерде қорғалуы, ал анықтау алгоритмі маусымдық тұтыну өзгерістерін ескеретін бапталатын шектерге ие болуы керек.

Бұл талаптар бір жағынан коммерциялық шешімдердің кемшіліктерін (жоғары баға, жабық экожүйе, жергілікті тілдің болмауы), екінші жағынан мерзімдік әдістердің шектеулерін (маманға және ауа райына тәуелділік) ескереді.

Қорытынды

Ағуды анықтау әдістеріне жасалған салыстырмалы талдау ағу орнын дәл көрсететін акустикалық әдістердің, георадардың, ИҚ-термография мен қашықтықтан зондтаудың мерзімдік тексеруге арналғанын, қымбат жабдық пен білікті маманды қажет ететінін және ауа райына тәуелді екенін көрсетті. Үздіксіз автоматты бақылау үшін шығын балансы, түнгі минималды шығын және қысымды бақылау әдістері ең қолайлы, себебі оларды арзан IoT құрылғыларында іске асыруға болады. Бір параметрге сүйену жалған дабылдарға әкелетіндіктен, бірнеше датчик деректерін біріктіру ұсынылады. Талдау нәтижесінде Қазақстан жағдайына бейімделген ағуды бақылау жүйесіне қойылатын алты негізгі талап тұжырымдалды. Зерттеудің келесі кезеңінде осы талаптар негізінде ESP32 микроконтроллері, шығын және қысым датчиктері, MQTT хаттамасы мен мобильді қосымшадан тұратын жүйенің архитектурасы мен анықтау алгоритмі әзірленеді.

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. Wols B.A., van Thienen P. Impact of weather conditions on pipe failure: a statistical analysis // Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA. – 2014. – Vol. 63, No. 3. – P. 212–223. – DOI: 10.2166/aqua.2013.088.

4. 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.

5. Lambert A., Hirner W. Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. – London: IWA, 2000.

6. 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.

7. Hunaidi O., Chu W.T. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes // Applied Acoustics. – 1999. – Vol. 58, No. 3. – P. 235–254. – DOI: 10.1016/S0003-682X(99)00013-4.

8. Yang J., Wen Y., Li P. Leak acoustic detection in water distribution pipelines // Proc. 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. – 2008. – P. 3057–3061. – DOI: 10.1109/WCICA.2008.4594487.

9. Bach P.M., Kodikara J.K. Reliability of infrared thermography in detecting leaks in buried water reticulation pipes // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 10, No. 9. – P. 4210–4224. – DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2708817.

10. Fahmy M., Moselhi O. Automated detection and location of leaks in water mains using infrared photography // Journal of Performance of Constructed Facilities. – 2010. – Vol. 24, No. 3. – P. 242–248. – DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000094.

11. Atef A., Zayed T., Hawari A., Khader M., Moselhi O. Multi-tier method using infrared photography and GPR to detect and locate water leaks // Automation in Construction. – 2016. – Vol. 61. – P. 162–170. – DOI: 10.1016/j.autcon.2015.10.006.

12. Agapiou A., Alexakis D.D., Themistocleous K., Hadjimitsis D.G. Water leakage detection using remote sensing, field spectroscopy and GIS in semiarid areas of Cyprus // Urban Water Journal. – 2016. – Vol. 13, No. 3. – P. 221–231. – DOI: 10.1080/1573062X.2014.975726.

13. 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.

14. 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.

15. Elshazly D.H. Development of a Smart System for Leak Detection in Water Distribution Networks: Master's thesis. – Sharjah: American University of Sharjah, 2021. – URL: http://hdl.handle.net/11073/21601.

16. 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.

17. 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.

18. Mashford J., De Silva D., Marney D., Burn S. An approach to leak detection in pipe networks using analysis of monitored pressure values by support vector machine // Proc. 3rd Int. Conf. on Network and System Security. – 2009. – P. 534–539. – DOI: 10.1109/NSS.2009.38.

19. 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.

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