

ӨОЖ 536.2; 536.42; 620.9; 621.472; 662.997
FTAXP 30.17.35; 30.17.00; 44.31.00; 27.35.45; 44.37.29

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-3-281-301>

¹**Карлина Е.И.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0008-2941-5775,
e-mail: kelisaveta123@gmail.com

¹**Ердеш Е.Б.,**

Жаратылыстану ғылымдарының магистрі, ORCID ID: 0000-0001-9623-5610,
e-mail: yelnaryerdesh@gmail.com

^{1,2}**Баимбетов Д.Б.,**

Жаратылыстану ғылымдарының магистрі, ORCID ID: 0000-0002-4992-0890, e-mail:
dynmuhambet@gmail.com

¹**Джамакеев И.Б.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0005-9596-6944,
e-mail: jamakeyev.i@gmail.com

³**Моханрадж М.,**

профессор, ORCID ID: 0000-0003-4870-3496,
e-mail: mohanrajrac@yahoo.co.in

^{1,4*}**Беляев Е.К.,**

қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-7947-2179,
*e-mail: yerzhan.belyaev@kaznu.edu.kz; yerzhan.belyayev@gmail.com

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Алматы қ., Қазақстан

²Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжиниринг университетіні,
130000, Ақтау қ., Қазақстан

³Үндістан инженерлік-технологиялық колледжінің Инженерлік механика департаменті,
641 032, Коимбатор қ., Үндістан

⁴Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университетіні,
050013, Алматы қ., Қазақстан

КҮН ДИСТИЛЛЯТОРЫ ІШІНДЕГІ БУЛАНУ ЖӘНЕ КОНДЕНСАЦИЯЛАНУ КЕЗІНДЕГІ ЕКІ ФАЗАЛЫҚ ЖЫЛУ АЛМАСУ ПРОЦЕСТЕРІН САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа

Бұл мақалада лицензияланған ANSYS 2023R2 бағдарламалық пакетін және есептеу гидродинамикасы (CFD) әдісін пайдаланып екі күн дистилляторының конфигурациясының салыстырмалы талдауы берілген. Модельдеу үшін сұйықтықтың бір фазадан екіншісіне өтуін есептеуге мүмкіндік беретін VoF (Volume of Fluid) моделі қолданылды. VoF моделі теориялық көзқарасқа сәйкес келетін сандық нәтижелерді іс жүзінде қолданбай, тек визуализация үшін булану процестерін жаңғыртуға қабілетті екенін атап өткен жөн. Зерттеудің өзектілігі су тұщыту жүйелерінің тиімділігін арттыруды талап ететін жаһандық ауыз су дағдарысымен байланысты. Таза су алудың бұл әдісі ең экологиялық таза әдіс, бұл зерттеу нысанын таңдауға басты себеп болды. Жұмыстың мақсаты – күн дистилляторын сандық талдау және зерттеу, оның екі конфигурациясын салыстырмалы талдау, сондай-ақ қондырғының тиімділігін арттыру үшін ықтимал модификацияларды бағалау. Зерттеу барысында қондырғының ішіндегі жылу ағындары, сонымен қатар будың көлемдік үлесінің таралуы және уақыт бойынша температураның өзгеруі модельденді. Алынған нәтижелер бір көлбеу конфигурациямен салыстырғанда қос көлбеу конфигурациясының жоғары тиімділігі мен өнімділігін көрсетеді. Зерттеу сонымен қатар дистиллятор ішінде болып жатқан физикалық процестерді егжей-тегжейлі сипаттайды және осы жүйені ANSYS модельдеуде одан әрі жетілдіру бағыттарын анықтайды.

Тірек сөздер: күн дистилляторы, екі фазалы жылу алмасу, булану және конденсациялау, ANSYS Fluent, сандық талдау.

Кіріспе

Қазіргі уақытта ауыз су тапшылығы проблемасы әлемнің көптеген аймақтарында, әсіресе таза суға қол жетімділік шектеулі жерлерде барған сайын өзекті болып отыр. 1999 жылдың өзінде [1] бұл мәселеге назар аударылды: Жердегі жалпы су ресурстарының 1,4 млрд текше километрінің 2,5%-дан азы тұщы су, оның тек 0,26%-ы көлдер мен өзендер сияқты жер үсті көздерінен келеді. Дегенмен, барлық судың шамамен 0,3–0,5%-ы ғана адам пайдалануына жетеді. Тұщы судың үлесі әлі 2–3 пайызды құраса да, оның қоры бірте-бірте азайып келеді, бұл ауыз суды өндірудің шешімін табу қажеттілігін көрсетеді.

Қазақстанда, әсіресе Орталық және Батыс Қазақстанда, сондай-ақ Маңғыстау және Атырау облыстарында сумен қамтамасыз етуде қиындықтарды бастан кешіруде. Соңғы жылдары бұл мәселе бүкіл елді қамтыды. Осы мәселені шешу және өңірлерді электр және жылу энергиясымен қамтамасыз ету үшін 1968 ж. Маңғыстау атом электр станциясы (МАЭК) салынып, әлі күнге дейін жақын маңдағы елді мекендерді ауыз сумен қамтамасыз етіп келеді. Дегенмен, бұл әдіс экологиялық тәуекелдермен, соның ішінде апаттар ықтималдығымен және ядролық қалдықтарды кәдеге жарату қиындығымен байланысты.

Көптеген елдердің күн энергиясын пайдаланудың жоғары әлеуеті бар, Қазақстан да бұдан тыс емес. Дүниежүзілік банк пен Халықаралық қаржы корпорациясы ұсынған 2024 ж. 29 сәуірдегі Global Solar Atlas деректеріне [2] сәйкес, Қазақстандағы жалпы көлденең күн радиациясының деңгейі, орташа температура +7,1 °C болғанда, тәулігіне 3,09-дан 4,58 кВтсағ/м²-ге дейін ауытқиды. Қазақстандағы күн радиациясының деңгейі тәулігіне 3,62-ден 7,98 кВт/м²-ге дейін ауытқитын Австралияға қарағанда біршама төмен болғанымен, бұл әлі күнге дейін күнді тұщыту және күн жылу энергиясы сияқты технологияларды дамыту үшін жеткілікті, бұл үшін үлкен мүмкіндіктер ашылады.

Бұл мәселені шешудің ең экологиялық таза жолы – күн энергиясын пайдалану, әсіресе күн дистилляторларын пайдалану. Олардың қарапайым дизайны және басқа әдістермен салыстырғанда төмен құны оларды тазартылған суды өндіру үшін таңдауға өз артықшылықтарын береді. Қолжетімділігі мен тиімділігіне байланысты бұл әдіс әртүрлі елдерде көбірек қолданылады. Күн дистилляторлары кез келген су көзін, соның ішінде теңіз суын және ластанған су объектілерін тазарта алады. Олардың жұмысының негізгі принципі судың бір фазадан екіншісіне ауысуы болып табылады, бұл әдісті модельдеу процесін айтарлықтай күрделі етеді.

Дегенмен, стандартты қондырғылардың өнімділігі төмен болғандықтан, оларды жаңғырту қажеттілігі туындайды. [3]-ші жұмыстағы зерттеулерге сәйкес, күн дистилляторларының максималды тәжірибелік тиімділігі 45%-дан аспайды, бұл шамамен 4,26 кг/м²-ге тең. Тиімділікті арттыру, энергия шығындарын азайту, сенімділікті арттыру және әртүрлі климаттық жағдайларға бейімделу үшін дизайнға сәйкес өзгерістер қажет.

Күн дистилляторлары екі негізгі түрге бөлінеді: пассивті және белсенді. Пассивті дистилляторлар суды жылыту үшін тек күн энергиясына сүйенеді [4], ал белсенді жүйелер сыртқы көздерден алынатын жылу энергиясын қосымша пайдаланады [5]. Белсенді қондырғылар суды алдын ала қыздыруға арналған күн коллекторлары, фазаны өзгерту материалдарын (PCM) пайдалану және жалпы жүйе тиімділігін арттыру үшін басқа жақсартулар сияқты шешімдерді қолдана алады.

Пассивті күн дистилляторлары әртүрлі конфигурацияларда құрастырылуы мүмкін. Олар пішіні бойынша ерекшеленеді: бір және екі еңісті, сфералық, конус тәрізді және т.б., сондай-ақ 15°-тан 45°-қа дейін өзгертін еңіс бұрышында географиялық координаттарға байланысты жасалынады [6]. Дистилляторлардың конструкциясында бір немесе бірнеше су бассейндері болуы мүмкін [7]. Тиімділікті арттыру үшін күн радиациясының сіңірілуін жақсарту әдістері жиі қолданылады, мысалы, әйнектің жиектеріне концентраторларды орнату [8], айналарды

пайдалану немесе дистилляторды параболалық коллектор-концентратор түрінде жасау [9]. Сондай-ақ графит, алюминий және басқалары сияқты әртүрлі абсорберлік материалдар зерттелуде [4], ал кейбір жағдайларда құрылыс құнын төмендету үшін абсорберге [10] тастар қосылады, олар фазалық өзгерістер материалдарын (PCM) алмастыра алады. Бұл жақсартулардың барлығы жүйе өнімділігін жақсартуға бағытталған.

Белсенді жүйелерде әдетте суды қосымша қыздыру немесе сыртқы салқындатқыш элементті қолдану арқылы конденсация процесін күшейту қолданылады [11]. Бұған газ немесе электр қазандығын орнату немесе жүйеге орнатылған буландырғыш арқылы өтетін салқындатқышты біріктіру арқылы қол жеткізуге болады.

Күн дистилляторларына олардың тиімділігін арттыру үшін үнемі зерттелетін басқа да модификациялар бар. Бұл жақсартулар аймақтың климаттық жағдайларына байланысты өзгеруі мүмкін: кейбір шешімдер өнімді болмауы мүмкін, ал басқалары жүйе өнімділігін айтарлықтай жақсартып алады. Мысалы, [12]-ші жұмыстаға авторлардың шолу мақаласында 2015 жылы күн дистилляторларының 38-ге жуық әртүрлі үлгілері қарастырылды, олардың математикалық модельдерін талдау және модификациялардың тиімділігін бағалауы көрсетілген.

Бұл мақалада ANSYS бағдарламалық құралының құрамында бар солверлер арқылы бір және екі еңісті күн дистилляторын модельдеу әдісі ұсынылады.

Күн дистилляторлары тақырыбын көптеген ғалымдар белсенді түрде зерттеді. Олардың ішінде В. Беллессотис, С. Калогироу, Э. Дельяннис, Р.В. Данкл, С.К. Шукла, В.П.С. Сораян, Мостафа Х. Шаркави, Джон Х. Лиенхард, В. Сайед, М. Зубайр және т.б. бар. Күн дистилляторлары бойынша негізгі зерттеулер мен нәтижелер бірқатар кітаптарда егжей-тегжейлі берілген, соның ішінде термиялық күнді тұщыландыру: В. Василис, К. Сотерис және Д. Эмми әдістері мен жүйелері [13], Күн көмегімен дистилляциялау: шатырдағы дистиллятор және көп кадамды дистиллятор диффузиясы» Р.В. Данкл [14], сонымен қатар «Күн дистилляторларын термиялық модельдеу және тәжірибелік тексеру» С.К. Шукла және В.П.С. Сораян еңбектерінде кездеседі [15].

Күн дистилляторларының жұмыс істеу принципі келесідей: абсорбер күн радиациясын қабылдайды және оны жылу энергиясына айналдырады, бұл оның қызуын тудырады. Содан кейін бұл жылу конвекция арқылы сұйықтыққа беріледі, бұл оның булануына әкеледі. Булану кез келген температурада болуы мүмкін, өйткені сұйық молекулаларының кинетикалық энергиясы молекулааралық тартылыс күштерін жеңіп, су бетінен бөлініп шығу үшін жеткілікті. Булану нәтижесінде қалған сұйықтықтың температурасы төмендейді [16]. Алынған бу көтеріледі. Күн радиациясын жақсы өткізетін және оны нашар сіңіретін шыны өз температурасын сіңіргіштен төмен, бірақ қоршаған ортадан жоғары деңгейде ұстайды. Бұл сұйықтық пен шыны арасындағы жүйенің ішіндегі ауаның қызып кетуіне байланысты болады, ал бу шыныға жеткенде булану кезінде сіңірілген жылуды босатып, қайтадан сұйық фазаға өтеді. Бұл жағдайда әйнек жел және қоршаған атмосфера сияқты сыртқы әсерлерден салқындатылады. Бу шыныға тиген кезде ол энергияны жоғалтады, бұл су тамшылары түріндегі конденсацияны тудырады. Бұл тамшылар әйнек бетімен арнайы арналарға ағып, жинау ыдысына түседі. Буланған кезде дистиллятордағы сұйықтық деңгейін ұстап тұру үшін суық су (20 °C) қосылады.

Бұл мәселе белгілі бір қиындықтарды тудыратын 100 °C төмен температурада сұйықтықтың фазалық ауысу процесін қарастырады. Максвелл-Больцман таралымы бойынша [17, 18], тіпті төмен температураның өзінде олардың саны әлдеқайда аз болғанымен, молекулааралық күштерді жеңіп, сұйықтықты қалдыруға жеткілікті кинетикалық энергиясы бар молекулалар болады. Қазіргі уақытта қайнауды сипаттайтын жақсы дамыған модельдер бар, бірақ мұндай төмен температурада булану процесі көбінесе елеусіз болып саналады және жиі ескерілмейді. Бұл берілген физикалық құбылысты модельдеуді қиындатады. Әдетте сұйықтықтың бетінен булану жылдамдығын анықтау үшін температура мен ішінара қысымды байланыстыратын теңдеулер қолданылады. Молекулалардың қозғалу жылдамдығы температураға тура про-

порционал болғандықтан, оның жоғарылауымен булану қарқындылығы артады. Парциалды қысым берілген температурада қаныққан бу қысымынан төмен болғанда, булану тепе-теңдікке жеткенше жүреді [17].

Күн дистилляторы жүйесінде жылу алмасудың келесі түрлері байқалады: күн, шыны беті және абсорбер арасындағы сәулелену; абсорбер мен су арасындағы, сондай-ақ конденсация кезінде бу мен шыны арасындағы конвективті жылу алмасу. Негізгі жылу жоғалуына (шығындарына) мыналар жатады: дистиллятордың шыны және корпусы арқылы қоршаған ортаға жылудың ағуы; сұйықтықтың булануы кезіндегі жылуды жоғалту; су мен шыны арасындағы ауаның болуынан туындаған жылу жоғалту; сондай-ақ желдің әсерімен байланысты шығындар. Өткізгіштік арқылы құрылым арқылы жылу беру шамалы және бұл жүйеде есепке алынбайды деп қарастырылған.

VoF (Volume of Fluid) моделі күрделі Эйлер-Эйлер моделінің жеңілдетілген нұсқасы болып табылады. Фазалық ауысу мәселелерін шешудің екі негізгі тәсілі бар: Эйлер-Эйлер моделі және Эйлер-Лагранж моделі. Эйлер-Эйлер моделі басқару көлемдерімен байланысты теңдеулерге негізделген [19] және оның бірнеше нұсқалары ANSYS бағдарламалық пакетінде ұсынылған, оның ішінде бастапқы үлгіден тыс үш қосымша нұсқасы бар. Керісінше, Эйлер-Лагранж моделі Лагранж координаталар жүйесіндегі теңдеулермен жұмыс істейді, мұнда әрбір бөлшек бөлек қарастырылады, бұл оны ANSYS-те қолданылатын басқару көлемінің әдісі үшін қолайлы емес етеді. «Эйлер-Лагранж» атауы Эйлердің үздіксіздік теңдеулерін қолданумен байланысты [20]. Эйлер-Эйлер моделінде фазалар кеңістік пен уақытқа тәуелді көлемдік үлес ұғымын қолдануға мүмкіндік беретін өзара енетін үздіксіздік ретінде сипатталады. Жалпы Эйлер-Эйлер моделі фазалық ауысуды дәл сипаттау үшін теңдеулердің көп санын шешуді қажет етеді.

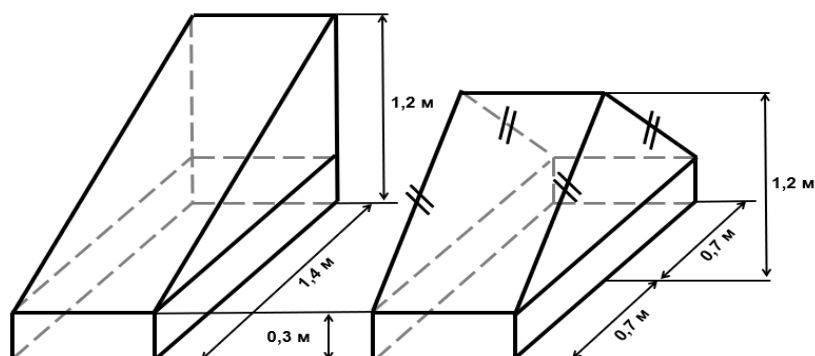
Бұл жұмыстың мақсаты – ең тиімді дизайнды анықтау үшін ANSYS бағдарламалық құралын пайдалана отырып, күн дистилляторларының екі түрін - бір көлбеу және екі еңісті - сандық зерттеу және салыстыру. Зерттеудің ғылыми жаңалығы күн дистилляторында болып жатқан процестер алғаш рет ANSYS жүйесінде VoF (сұйықтықтың көлемі) моделін қолдану арқылы имитацияланды, бұл булану ағындарын визуализациялауға мүмкіндік берді.

Материалдар мен әдістер

Есептің физикалық қойылымы

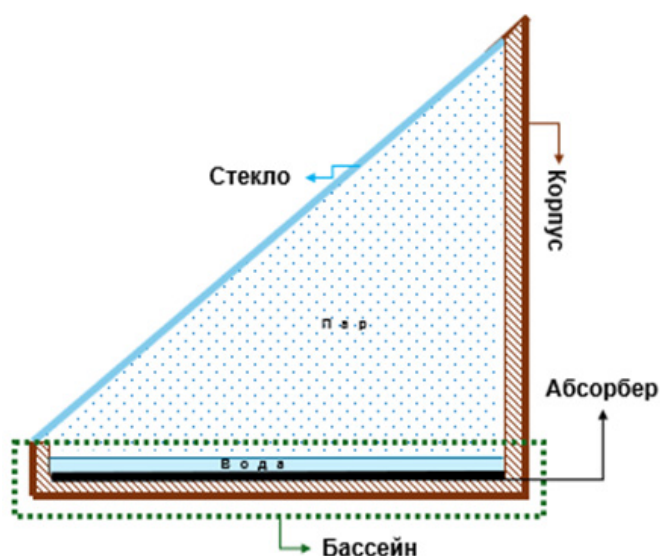
Нәтижелерді дәл салыстыру үшін қондырғының резервуарының көлемін, оның төменгі бөлігінің ауданын, сондай-ақ құрылымның жалпы көлемін бекіту туралы шешім қабылданды. Мұндай жағдайларда күн дистилляторының екі көлбеу моделі үшін жаңа конфигурация жасалды.

1-суретте оның барлық өлшемдерін көрсететін күн дистилляторының диаграммасы көрсетілген. Дизайнға әйнек панель, сіңіргіш пластина (абсорбер), алюминий корпусы және қондырғының периметрі бойынша жылу жоғалуын азайтуға арналған жылу оқшаулағыш қабаты кіреді. 2-суретте оның негізгі компоненттерін көрсететін күн дистилляторының екі өлшемді бүйірлік көрінісі көрсетілген. Төменгі жағында тұзды су ыдысы бассейн ретінде белгіленген. Әйнек бетінің қалыңдығы 4 мм, абсорбер тақтасы 2 мм, ал оқшаулағыш материал 5 см. Дистиллятордың әр элементінің массасы оның меншікті салмағымен анықталады. Қалыңдығы 4 мм әйнектелген бет үшін бұл параметр $10,12 \text{ кг/м}^2$, ал сіңіргіш үшін — $15,6 \text{ кг/м}^2$. 1-суретте көрсетілген геометриялық параметрлер бойынша шынының массасы 11,79 кг, ал сіңіргіштің массасы 15,29 кг болады. Абсорбер 300 сериялы тот баспайтын болаттан жасалған және оқшаулау шыны жүннен жасалған. Күн радиациясын сіңіру тиімділігін арттыру үшін абсорбер қара түске боялады.



Сурет 1 – Күн дистилляторының екі конфигурациясының схемасы

Тұзды су бассейнінің көлемі жоғарыда аталған екі конфигурация үшін бірдей және $0,336 \text{ м}^3$ тең. Күн дистилляторының жоғарғы бөлігінің көлемі $0,504 \text{ м}^3$, ол төменгі бөлігімен бірге $0,84 \text{ м}^3$ қондырғының жалпы ішкі көлемін береді. Абсорбер пластинасының көлемі оның жалпы ішкі көлемге елеусіз әсеріне байланысты ескерілмеген. Екінші конфигурацияның бірінші конфигурациямен салыстырғанда көлемі азырақ. Су ыдысының ұзындығы мен биіктігі – $0,1 \text{ м}$, қалыңдығы – $0,01 \text{ м}$ және ол құрылымның бүкіл еніне созылады. Есептеу торын оңтайландыру және есептеу ресурстарына қойылатын талаптарды азайту үшін геометрияның мұндай таңдауына назар аударылды. Бұл ең үлкен кеңістіктік тор аралығын $0,02 \text{ м}$ -ге дейін орнатуға мүмкіндік береді.



Сурет 2 – Бір көлбеу күн дистилляторының көлденең қимасы

Математикалық модельдеудің негізгі болжамдары:

- ♦ Сыртқы температура $23,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ немесе 297 K және тұрақты болып саналады;
- ♦ Күннің тікелей сәулеленуі 800 Вт/м^2 , ал диффузиялық сәулеленуі 100 Вт/м^2 , сәулелену де тұрақты болып саналады;
- ♦ Солверде көрсетілген есептік уақыт аралығында күн позициясының өзгеруі екі конфигурация үшін де бірдей деп қабылданады;

- ♦ Бұдың әлсіз сығылатын қасиетіне байланысты сұйық ағыны идеалды және сығылмайтын деп есептеледі;
- ♦ Бу мен су арасындағы температура градиентіне байланысты параметрлердің өзгеруі есепке алынбайды;
- ♦ Абсорбер пластинасының түбінің астында жылу жоғалуы жоқ деп есептеледі (адиабаталық қабырға);
- ♦ Бассейндегі тұзды судың қайта толтырылуы есепке алынбайды, булану есебінен бассейн суының көлемі өзгереді.

Булану (конденсация) кезіндегі екі фазалы жылу алмасуды сандық модельдеу сұйықтық көлемі немесе Volume of Fluid (VoF) әдісін қолдану арқылы жүзеге асырылды. Бұл модель массаның, импульстің және энергияның сақталуының негізгі заңдарын толығымен қанағаттандырады. VoF құрамына сұйық және газ фазаларының көлемдік үлесін есептеуге арналған теңдеу (массаның сақталуы), Навье-Стокс түріндегі қозғалыс теңдеуі және энергияның сақталуына арналған бір теңдеу кіреді. VoF моделі фазалар арасында нақты шекара бар жағдайлар үшін жеңілдетілген. Бұл модель күн дистилляторы кабинасының ішіндегі екі фазалы жылу алмасуды модельдеуге өте ыңғайлы, өйткені сұйық фаза (тұзды су) мен ауа мен су буының (газ фазасы) қоспасы арасында нақты шекара бар. Сонымен қатар, VoF моделі есептеу уақытының қысқаруымен, есептеу ресурстары мен торға жүктеменің төмендеуімен сипатталады, сонымен бірге сұйықтық пен газ арасындағы шекараның өзгеруін бақылауға мүмкіндік береді. Сандық модельдеу кезінде су тығыздығының температураға көпмүшелік тәуелділігі (сызықтық полином) формуласы қолданылды. Бұл тәуелділік температураның судың қасиеттеріне әсерін толығырақ бағалауға мүмкіндік берді.

Артықшылықтан басқа, VoF моделінің шектеулері бар:

- ♦ тек сығылмайтын сұйықтық солверлерін қолдану (pressure-based solver);
- ♦ бастапқы шарттар ретінде пайдалану фазалардың бірін немесе олардың комбинациясын орнату;
- ♦ VoF моделін пайдалану кезінде берілген массалық ағынмен бойлық мерзімді (периодты) ағынды модельдеу мүмкін емес;
- ♦ айқындалмаған схеманы іске асыру кезінде уақыт туындысы үшін дәлдіктің бірінші ретті жуықтауын ғана қолдану.

Қолданылатын ANSYS Fluent бағдарламалық құралында Ли моделі булану және сәйкесінше конденсация процестерін имитациялау үшін қолданылады. Бұл модельдегі ең басты жері фазалық ауысу процесі басталатын қанығу температурасын орнату болып табылады. Негізінде, күн дистилляторының кабинасының ішінде бу өндіру процесі 100 °C төмен температурада жүреді. Бұл физикалық тұрғыдан қарағанда дұрыс құбылыс, өйткені модель қанығу температурасына ғана емес, сонымен қатар қанығу қысымына да байланысты. Қанығу температурасы ANSYS пайдаланушы функцияларын қолданып қолмен еңгізілді [21]. Бұл жағдайда қанығу температурасы 0 °C деп есептелді, бұл физикалық тұрғыдан дұрыс емес, бірақ фазалық ауысу жиілігі үшін коэффициенттер арқылы түзетілді. Нәтижесінде булану және конденсация процестері бөлек талданды.

ANSYS жүйесіндегі VoF моделі бастапқыда 100 °C температурада судың қайнауын модельдеуге дайындалғандықтан, жасалған жорамалдардың нәтижесінде жылдамдық пен температура профилдерін талдау артық бағалануы мүмкін. Сондықтан жобаның екі нұсқасын салыстыру жылдамдық пен температура өрістерін талдауға негізделеді.

Есептің математикалық қойылымы

Жоғарыда айтылғандай, математикалық модель массаның, импульстің және энергияның сақталуының фундаменталды заңдарына негізделген. Ұсынылған математикалық модельдің сандық орындалуы мен есептеу алгоритмі ANSYS 23R2 бағдарламалық құралында толық сипатталған [22].

Әрбір бақылау көлемі үшін есептелетін сұйық және газ фазаларының көлемдік үлесінің теңдеуі былай жазылады:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}), \quad (1)$$

мұндағы q және p әр түрлі фазалардың көрсеткіштері. ρ_q – тығыздық; α_q – көлемдік үлес; $\bar{v}_q$ – толық қозғалыс жылдамдығы; S_{α_q} – фазалық ауысу кезінде энергия көзіне жауапты элемент; $\dot{m}_{pq}$ және $\dot{m}_{qp}$ сәйкесінше массаның p фазасынан q фазасына және q фазасынан p фазасына ауысуы. Массалық ауысу және S_{α_q} Ли моделі арқылы есептеледі. S_{α_q} сұйық пен газ арасындағы энтальпия айырмасының және фазаның массалық үлесінің көбейтіндісі ретінде есептеледі.

Навье-Стокс түріндегі импульстің сақталу теңдеуі былай жазылады:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla (\rho \bar{v} \cdot \bar{v}) = -\nabla p + \nabla [\mu (\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T)] + \rho \bar{g} + \bar{F}, \quad (2)$$

мұндағы F ағынға әсер ететін сыртқы күштерді білдіреді; g гравитацияның үдеуін білдіреді ($9,81 \text{ м/с}^2$); p – қысым.

Энергияның сақталу теңдеуі келесі түрде жазылады:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla (\bar{v} (\rho E + p)) = \nabla (k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_q \sum_j h_{jq} \bar{J}_{jq} + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \bar{v})) + S_h, \quad (3)$$

мұндағы E – жалпы энергия; k_{eff} – молекулалық және турбуленттік жылу өткізгіштіктің жалпы коэффициенті; T – температура; h_{jq} – j -ші бөлшектің меншікті энтальпиясы; J_{jq} – j -ші бөлшектің диффузиялық ағыны; S_h – сәулеленудің жылу ағыны; τ_{eff} – молекулалық және турбуленттік кернеулердің толық тензоры. (3) теңдеудегі оң жақтағы алғашқы үш шарт жылу өткізгіштікке, диффузияға және тұтқыр диссипацияға байланысты жылу алмасуды сипаттайды. Бұл есепте көлемдік жылу ағыны нөлге тең емес және күн радиациясымен анықталады.

VoF моделінде алынған энергия массалық өлшенген орташа мән ретінде келесі түрде есептеледі:

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q}, \quad (4)$$

мұндағы толық энергия E_q келесі түрде ұсынылады:

$$E_q = h_q - \frac{p}{\rho_q} + \frac{v^2}{2}, \quad (5)$$

мұнда көрсетілген фазаның нақты h_q энтальпиясы меншікті жылу сыйымдылығы мен екі фазаның орташа температурасы негізінде есептеледі.

Сұйықтық пен буды массалық тасымалдауға арналған Ли моделі (булану/конденсация) бу тасымалдау теңдеулеріне негізделген және келесі түрде ұсынылған:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \nabla (\alpha_v \rho_v \bar{v}_v) = \dot{m}_{lv} - \dot{m}_{vl}. \quad (6)$$

Мұнда v таңбашасы буды, ал l – сұйықты білдіреді. Теңдеудің оң жағында массаның сұйықтан буға (булану) және будан сұйыққа (конденсация) өтуі көрсетілген. Әрбір жеке ұяшықта осы процестердің бірі нөлге тең болады. Булану немесе конденсация қанығу температурасына байланысты өзгереді. Сұйықтық температурасы қанығу температурасынан асқанда булану жүреді. Бу температурасы қаныққан температурадан төмен болса, конденсация басталады.

Булану жағдайында $\dot{m}_{lv}$ мына формула бойынша есептеледі:

$$\dot{m}_{lv} = \text{coeff} \cdot \alpha_l \rho_l \frac{(T_l - T_{\text{sat}})}{T_{\text{sat}}}. \quad (7)$$

Конденсация жағдайында $\dot{m}_{lv}$ келесі формула бойынша есептеледі:

$$\dot{m}_{lv} = \text{coeff} \cdot \alpha_v \rho_v \frac{(T_{\text{sat}} - T_v)}{T_{\text{sat}}}. \quad (8)$$

(7) теңдеуде сұйықтық параметрлері, ал (8) теңдеуде газ параметрлері қолданылады. Coeff – қолмен орнатылған тұрақты коэффициент және уақыт бойынша релаксация коэффициентін білдіреді. Бұл коэффициент фазалық ауысу жылдамдығын реттейді және тәжірибелік деректерге немесе теориялық болжамдарға сәйкес сандық нәтижелерді таңдау негізінде анықталады.

Осы формулалардан (7) және (8) кейін (1) теңдеуде болатын S_{aq} жылу көзі анықталады. Ол үшін масса алмасу жылдамдығы ($\dot{m}_{lv}/\dot{m}_{vl}$) жасырын жылуға (энтальпия) көбейтіледі. Булану процесі кезінде (1) теңдеудегі S_{aq} бастапқы термині жылу сіңіргіш қызметін, ал конденсация кезінде жылу көзі ретінде қызмет етеді. Энтальпия сұйықтықтың буға өтуін бастау үшін қанша қосымша жылу қажет екенін көрсетеді. Бу жағдайында ол қайтадан сұйықтыққа айналғанда қанша энергия бөлінетінін көрсетеді.

Жоғарыда айтылғандай, энергияны сақтау теңдеуінде (3) көлемдік жылу ағынына жауапты термин күн радиациясымен анықталады. Бұл жұмыста күн радиациясының үлгісі ретінде Росселанд радиациялық моделі пайдаланылды. Бұл жағдайда осы модельде тұрақты температураны пайдалану әдеттегідей болды. Дегенмен, бағдарламалық қамтамасыз етудің функционалдығы аймақтың географиялық координаттарын орнатуға мүмкіндік береді және бағдарлама аймаққа байланысты күн радиациясының профилін автоматты түрде қосады.

Күн радиациясының бұл моделі ең қарапайым және тұрақты болып саналады. Радиацияның диффузиялық жуықтауы ретінде де белгілі Росселанд жуықтауы оптикалық тығыз ортада қолданылады және оптикалық қалыңдығы 3-тен асатын мәселелер үшін қолайлы. Бұл болжам күн дистилляторын модельдеу кезінде қолданылған.

Жоғарыда келтірілген (3) теңдеуде будың меншікті энтальпиясы идеалды сығылмайтын газ гипотезасы арқылы келесі түрде анықталады:

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho}, \quad (9)$$

мұндағы Y – j -ші бөлшектің массалық үлесі, ал h_j – сезілетін жылу, соның ішінде меншікті жылу сыйымдылығымен байланысты энтальпияның өзгеруі.

Жалпы жағдайда (9) өрнек келесі түрде беріледі:

$$h = C_p T + \frac{p}{\rho} \quad (10)$$

Шекаралық шарттар қойылымы

Корпус пен әйнек арқылы өтетін конвективтік жылу жоғалулардың жылу беру коэффициенті Ньютон-Рихманның классикалық формуласымен анықталады:

$$q = h_{\text{ext}} (T_{\text{ext}} - T_w), \quad (11)$$

мұндағы ext индексі сыртқы ортаны білдіреді, мұнда h – қоршаған ортамен конвективтік жылу алмасу коэффициенті, ал T – бет пен сыртқы орта үшін индекстері бар температура. Бұл шамалардың мәні жоғарыда сипатталған физикалық қойылымға сәйкес қолмен орнатылады.

Адиабаталық режимде жұмыс істейтін абсорбер үшін теңдеудегі жылу ағыны q нөлге тең:

$$T_w = \frac{q \Delta n}{k_s} + T_s, \quad (12)$$

мұндағы Δn – қатты дененің бетінен центріне дейінгі қашықтық, k – материалдың жылу өткізгіштік коэффициенті, s индексі – қатты дененің өзін білдіреді, ал w индексі – осы қатты

дененің беті. Сонымен (12) тендеу беттің температурасы дененің ішіндегі температураға тең екенін көрсетеді, ол жылуды жоғалтпайтын адиабаталық жағдайларға сәйкес келеді.

Күн дистилляторының кабинасындағы бу ретсіз қозғалады, оның үстіне Re және Pr саны сияқты өлшемсіз шамалардың мәні шекті мәндерден асып түседі. Сондықтан кабинаның ішіндегі екі фазалы ағын турбулентті режимде жүреді. Турбулентті ағынды модельдеу үшін таңдалған тәсіл RANS, Рейнольдс бойынша орташа алынған Навье-Стокс тендеулерінің жүйесі болды. Күн дистилляторы кабинасының шектеулі кеңістігіне байланысты k - ϵ турбуленттілік моделі k - ω үлгісімен салыстырғанда тұрақтырақ және бастапқы жағдайларға сезімталдығы төмен. Осы екі RANS қосалқы үлгілері арасында салыстыру жүргізілді, өйткені олар турбуленттік кинетикалық энергияны және осы энергияның жылуға диссипациясын қамтиды, бұл жылу беру мәселелеріне өте қолайлы. Өз кезегінде, k - ϵ моделінің үш белгілі нұсқасы бар: стандартты, RNG және realizable. Бұл мәселе үшін realizable k - ϵ моделі таңдалды, себебі ол құйынды құрылымдарды және сұйықтық қабаттарының бөлінуін барынша дәл сипаттайды, сонымен қатар физикалық негізделген және негізгі физикалық шектеулерді қанағаттандыратын жақсартылған диссипация тендеуін қамтиды. Realizable k - ϵ пайдалану арқылы турбулентті тұтқырлық үшін өрнекті осы нақты тапсырманың негізгі болжамдары негізінде түзету коэффициенті арқылы реттеуге болады. Сондықтан турбулентті ағындардың кең ауқымы, соның ішінде дистиллятор ішіндегі екі фазалы ағын үшін realizable k - ϵ басқа k - ϵ модификацияларымен салыстырғанда қолайлы нәтижелерді көрсетеді.

Рейнольдс бойынша орташа алынған Навье-Стокс тендеулерінен алынған турбуленттілік кинетикалық энергиясының тендеуі келесідей:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \quad (13)$$

мұндағы G_k – орташа жылдамдық градиентіне байланысты турбуленттік кинетикалық энергияның генерациясына жауапты термин, G_b – қалқымалы күштің әсерінен турбуленттік кинетикалық энергияның ұқсас генерациясы, Y_M – турбулентті ағынның сығылу әсеріне жауапты термин, S_k – энергия тендеуінің бастапқы термині, оны қарастырып отырған мәселеге байланысты пайдаланушы анықтайды.

Турбуленттік кинетикалық энергияның диссипациясының тендеуі келесі түрде жазылады:

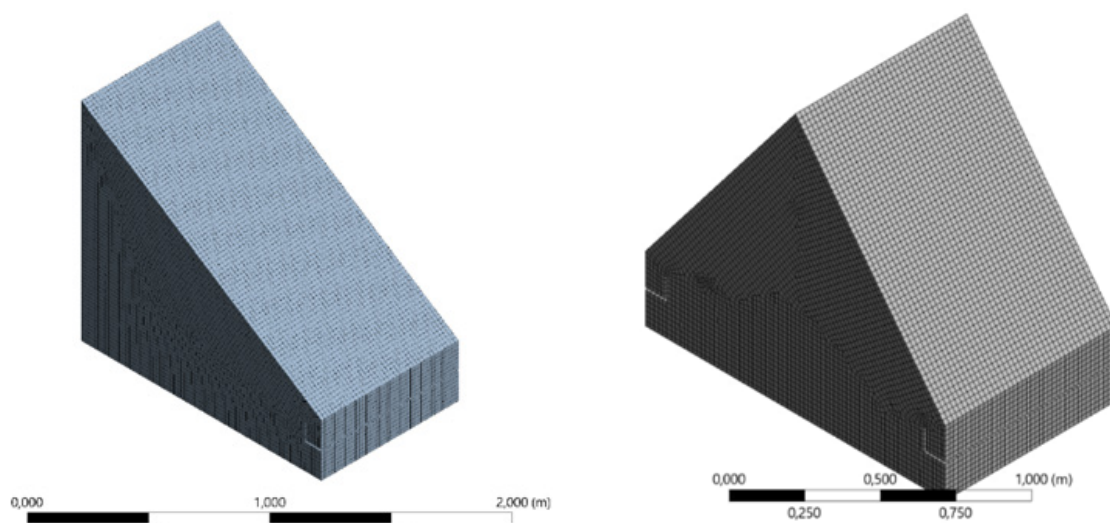
$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (14)$$

мұндағы C_1 және $C_{1\epsilon}$ стандартты тұрақты коэффициенттер, S – қарастырылып отырған тапсырмаға байланысты пайдаланушы белгілеген энергия көзі. Ұсынылған (13) және (14) тендеулерде өлшемсіз параметр σ турбулентті Прандтль саны болып табылады.

Жұмыс авторлары k - ϵ әртүрлі модификацияларын қолданып есептеулер жүргізді. Түрлі k - ϵ турбуленттілік модельдерін салыстыру бұл модельдің дәлірек және физикалық негізделген нәтижелерді беретінін көрсетті.

Модельдеу процесі

3-суретте бір және екі көлбеу күн дистилляторлары үшін ANSYS Fluent бағдарламалық құралында құрылған есептеу торлары көрсетілген. Ұсынылған мәселеде жүйеге түсетін және шығатын сұйықтық ағындары жоқ, күн радиациясының қыздыруынан болатын табиғи булану процесі қарастырылады. Дистиллятордың ішінде болып жатқан физикалық процестердің толығырақ визуализациясын алу үшін есептеу торының жоғары сапасын қамтамасыз ету қажет. Бір және екі көлбеу күн дистилляторларының күрделі геометриялық конфигурациясына байланысты торды құру кезінде текше ұяшық (тор), тетраэдрлер немесе олардың комбинациясы автоматты түрде пайдаланылады. Қабырғалардың жанында жылдамырақ нәтиже алу үшін тор көп майдаланбаған. Ең үлкен кеңістіктік элемент өлшемі (ұяшық) тор сапасын жақсарту үшін элементті тегістеу жоғары деңгейге орнатылған 0,02 м. 3-суреттен дистилляторлардың үшбұрышты геометриясына байланысты есептеу торына аралас элементтер кіретінін көруге болады. Мысалы, өтпелі аймақтарда тетраэдрлік элементтердің болатыны анық.



Сурет 3 – Екі конфигурация үшін есептеу торы

Кесте 1 – Тордың сипаттамасы

Сипаттама	Бір көлбеу күн дистилляторы	Екі көлбеу күн дистилляторы	Сапалы тор үшін қолайлы мәндер
Теориялық көлем	0,8388 м ³	0,8376 м ³	-
Бағдарламадағы көлем	0,83848 м ³	0,83696 м ³	-
Максималды арақатынасы	2,8	4,982	<5
Элементтің минималды сапасы	0,668	0,337	0(идеал)<x<1(жаман)
Минималды ортогональды сапасы	0,71	0,572	0(жаман)<x<1(идеал)
Максималды асимметрия	0,513	0,723	<1

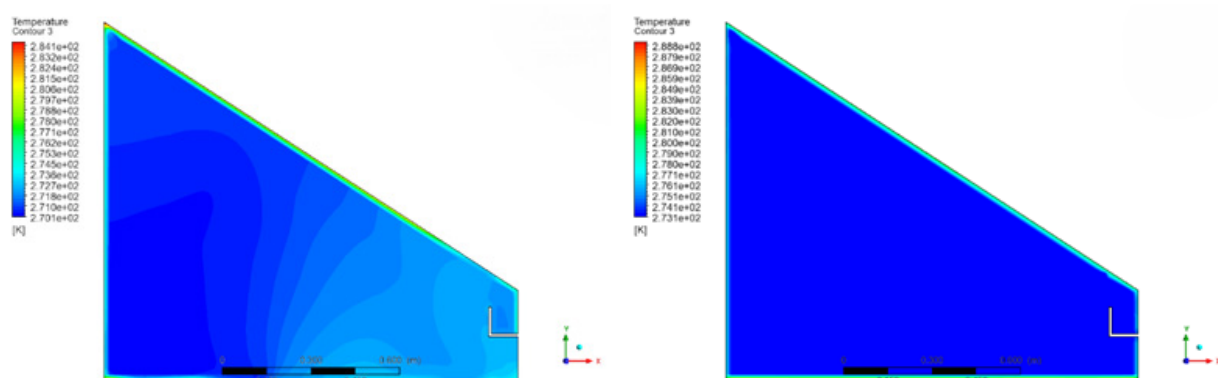
Тордың сапасын бағалау үшін 1-кестеде келтірілген параметрлер қолданылды. Бұл тордың жоғары сапасын растайды, кейінгі есептеулер үшін жеткілікті. Есептеу торын тексергеннен кейін шекаралық шарттар орнатылып, сипатталған физикалық модельге сәйкес материалдар мен олардың термодинамикалық қасиеттері анықталды.

Нәтижелер мен талқылау

Қарастырылып отырған екі күн дистилляторының конфигурациялары үшін дистиллятор кабинасының ішкі көлемі мен ортаңғы жазықтықтағы жылдамдық өрісін, сондай-ақ осы дистилляторлардағы будың мөлшерін салыстыру жүргізілді. Алынған нәтижелерді визуализациялау және табиғи булану процесінің эволюциясын көрсету үшін уақыт бойынша үш нүкте таңдалды, атап айтқанда бастапқы кезең, есептеудің ортасы және соңғы уақыт қадамы. Екі конфигурация үшін де 89 есептеу қадамдары қарастырылды. Талдау үшін негізгі нүктелер ретінде 1-ші, 44-ші және 89-шы қадамдары таңдалды.

4-суретте бастапқы уақыттағы күн дистилляторының кабинасындағы температураның таралуы көрсетілген. 4-суреттен көрініп тұрғандай, температураның біртіндеп өзгеруі

байқалады. Қазірдің өзінде бірінші қадамда температураның 300 К-ден 284 К-ге дейін төмендеуі байқалады, бұл фазалық ауысуға қосымша энергияның жұмсалыуымен түсіндіріледі. Жоғарыда айтылғандай, бұл қосымша энергия нақты энтальпиялардағы айырмашылыққа байланысты.

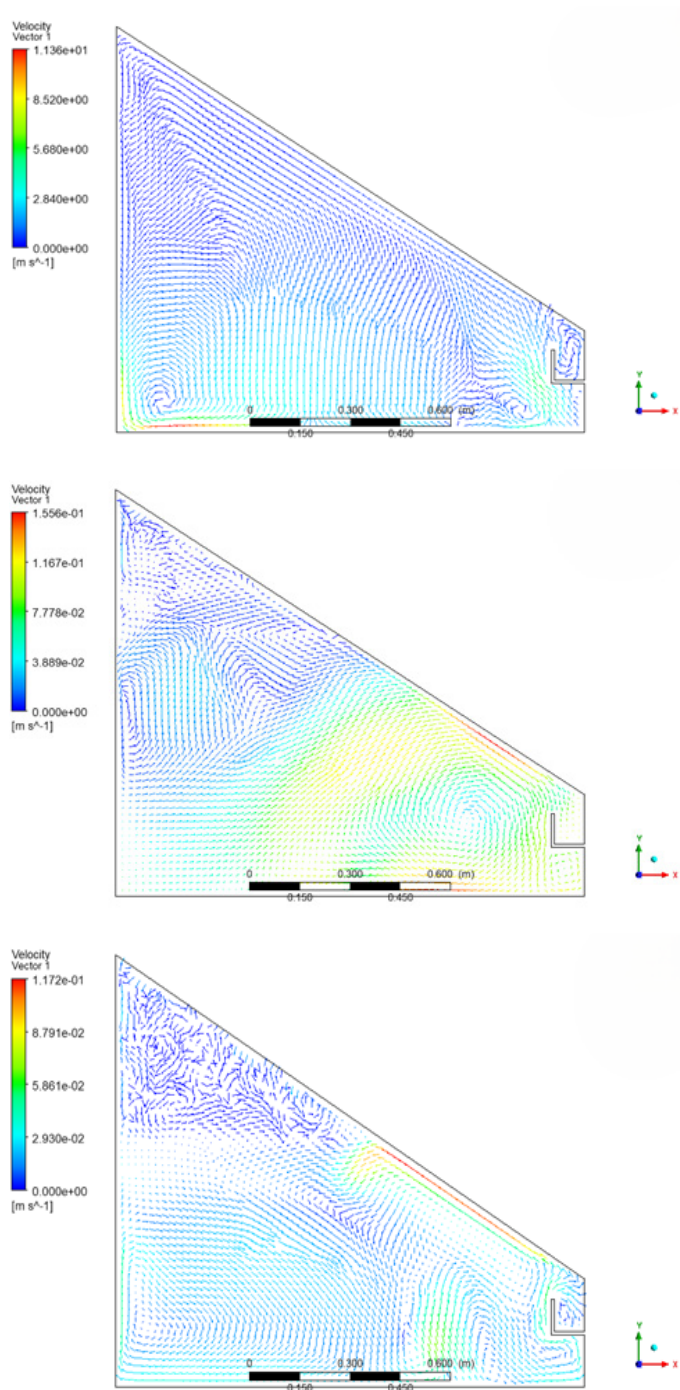


Сурет 4 – 1-ші және 89-шы уақыт қадамдарындағы
бір көлбеу күн дистилляторының қабырғасының температурасы

4-суретте сонымен қатар соңғы, 89-шы уақыт қадамындағы температураның таралуы көрсетілген. Алынған нәтижелер бойынша 89-қадамда температура тұрақтанды. Температураны тұрақтандыруға қажетті уақыт аралығы шамамен 5–6 қадамды құрайды, бұл модельдеу кезінде қарқынды булану процесіне байланысты. Температура өрісі үшін алынған графиктер физикалық тұрғыдан дұрыс және теориялық күтулерге сәйкес келеді. Көріп отырғаныңыздай, әйнек беттерінде және қабырғалардағы температура дистиллятордың ішкі бөлігіне қарағанда жоғары. Сондай-ақ, судың булануы кезінде сіңіргіш пластинаның температурасы бірте-бірте көтеріле бастайтынын байқауға болады, бұл бірінші және соңғы қадамдарды салыстыру кезінде анық көрінеді. Әйнек беттерінің көлбеу орналасқан ішкі бөлігінен жиналған конденсацияланған суды жинауға арналған науалар конденсаттың кері булануын болдырмау үшін салқын болуы керек.

5-суретте ортаңғы қимадағы 1-ші, 44-ші және 89-шы уақыт қадамындағы жылдамдық векторлары көрсетілген. Бірінші реттік қадамда судың беткі қабаттарының булануы кезінде жылдамдық өрісінің өзгеруінен туындаған құйындылар анық көрінеді. Қозғалыс бағыты жоғары, оны жылдамдық векторларынан көруге болады. Қалқымалы әсердің арқасында су буы жеңіл болғандықтан дистиллятор кабинасының жоғарғы қабаттарын басып алуға бейім. Құйындар байқалатын орындар қарқынды бу түзілу көрсеткіші болып табылады, өйткені газдардың қозғалысы жылу әсерінен болады. 44-ші уақыт қадамында құйындылардың өлшемдері ұлғаяды, ағынның жылдамдығы да артады. Бұл кезеңде бу локализацияланбай, судың бүкіл беті бойынша біркелкі ағындармен қозғалады. Қабырғалар бойындағы векторлар будың жоғары қарай қозғалысын көрсетеді, бұл теориялық болжамдарға сәйкес келеді.

89-шы уақыт қадамында су буы дистиллятордың жоғарғы бөлігінде шоғырланған, онда хаотикалық қозғалыс байқалады. Жоғарыда жазылғандай, бұл жағдайда конденсацияны модельдеусіз тек булану қарастырылады. Яғни, булану мен конденсация бөлек модельденеді. Су буы құрылғының үстіңгі жағынан кете алмайды, өйткені дистиллятор толығымен оқшауланған. Бұл қондырғының жоғарғы бөлігінде құйындылардың қарқынды қалыптасуына әкеледі. Дистилденген суды жинауға арналған науалар айналасында 1-ші және 89-шы уақыт қадамдарында құйынды қозғалыстар да байқалады. Бұл науалар кедергі ретінде әрекет ететіндіктен және олардың айналасында су буы ағып жатқанда олардың айналасында құйындылар пайда болады.

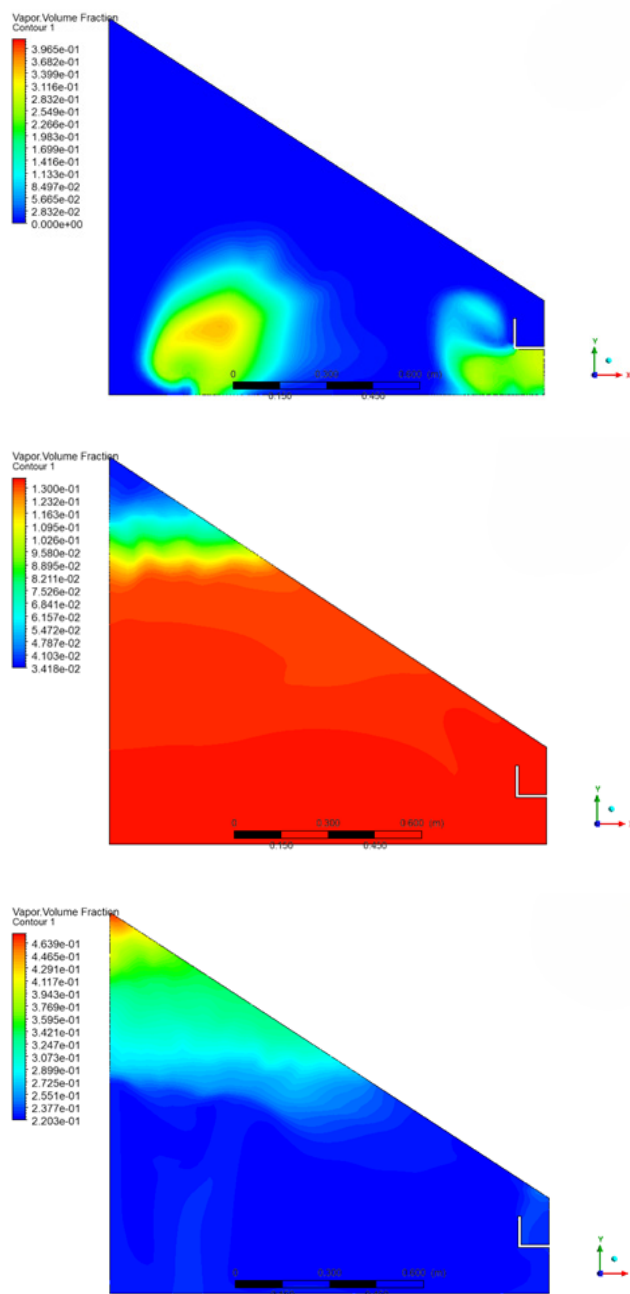


Сурет 5 – Бір көлбеу күн дистилляторы үшін 1-ші, 44-ші, 89-шы уақыт қадамдарындағы жылдамдық векторларының өрісі

6-суретте күн дистилляторының ішіндегі су буының көлемдік үлестерінің өзгеруі көрсетілген. Алынған сандық нәтижелерге сәйкес, уақыттың бастапқы моментінде тұзды су мен ауаның шекарасында су буы жергілікті түрде түзілетіні анық. Бұл нәтижелерді 5-суретте келтірілген бастапқы моменттің нәтижелерімен салыстыратын болсақ, бұл аймақта төменгі температура тіркелгенін көреміз, бұл энтальпиялар айырмашылығымен расталады. 6-суретке сәйкес, 44-ші уақыт қадамында су буының көлемдік үлесі артып, бірте-бірте көтеріледі. Бұл кезеңде сұйықтықтың барлық бос бетінде булану процесі жүреді. 89-шы уақыт қадамында

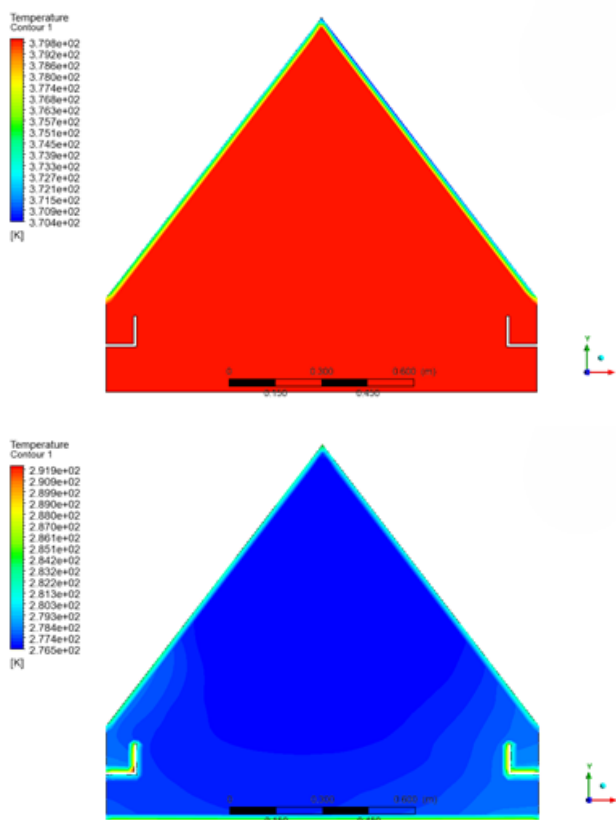
будың негізгі бөлігі дистиллятордың жоғарғы бұрышында шоғырланған. Конденсация процесі ескерілмесе, будың бұл әрекеті физикалық түрде негізделген. Теориялық тұрғыдан алғанда, әйнек бетімен жанасатын бу дистиллятордың жоғарғы жағына жетпей конденсациялануы керек деп есептелді. Дегенмен, алынған нәтижелер берілген жүйедегі бу әрекетінің ықтимал үлгілерінің бірі ретінде мағынасы бар.

Әрі қарай, біз екі көлбеу күн дистилляторы үшін есептеу нәтижелерін ұсынамыз, мұнда бастапқы және шекаралық шарттарды ескере отырып, барлық шешуші параметрлері бір көлбеу нұсқасымен бірдей.



Сурет 6 – Бір көлбеу күн дистилляторы үшін 1-ші, 44-ші, 89-шы рет қадамдарындағы су буының көлемдік үлесі

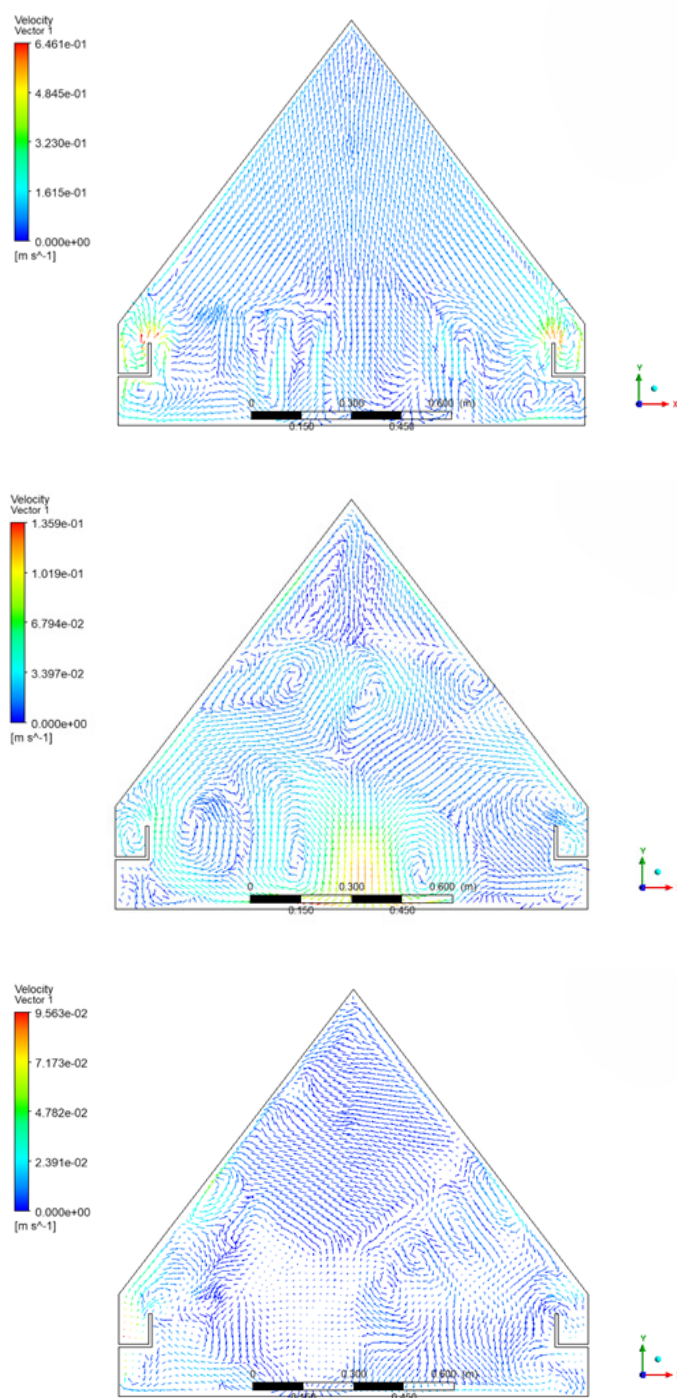
7-суретте екі көлбеу күн дистилляторының корпус қабырғасының температуралық таралуы көрсетілген. Екінші конфигурациядағы әйнек бетінің үлкен ауданына байланысты, дистиллятор кабинасына көбірек күн радиациясы түседі және сәйкесінше, бастапқы температура бірінші нұсқаға қарағанда жоғары. Бұл ретте әйнектің температурасы жоғарырақ жылу өткізгіштікке және сыртқы ортамен жанасу бетіне байланысты бір көлбеу нұсқаға қарағанда айтарлықтай төмен. 10–12 уақыт қадамынан кейін қабырғаның температурасы төмендей бастайды. Бұл фазалық ауысуды жүзеге асыру үшін меншікті энтальпиялар айырмашылығына тең қосымша жылу қажет болатындығына байланысты. Осылайша, қарқынды булану кезеңінде температураның айтарлықтай төмендеуі орын алады. Соңғы кезеңдегі температураның таралуы теориялық болжамдарға сәйкес келеді, орнату контуры бойынша максималды температура мәндері, әсіресе суы бар аймақта.



Сурет 7 – 1-ші және 89-шы уақыт қадамындағы екі көлбеу күн дистилляторының қабырға температурасы

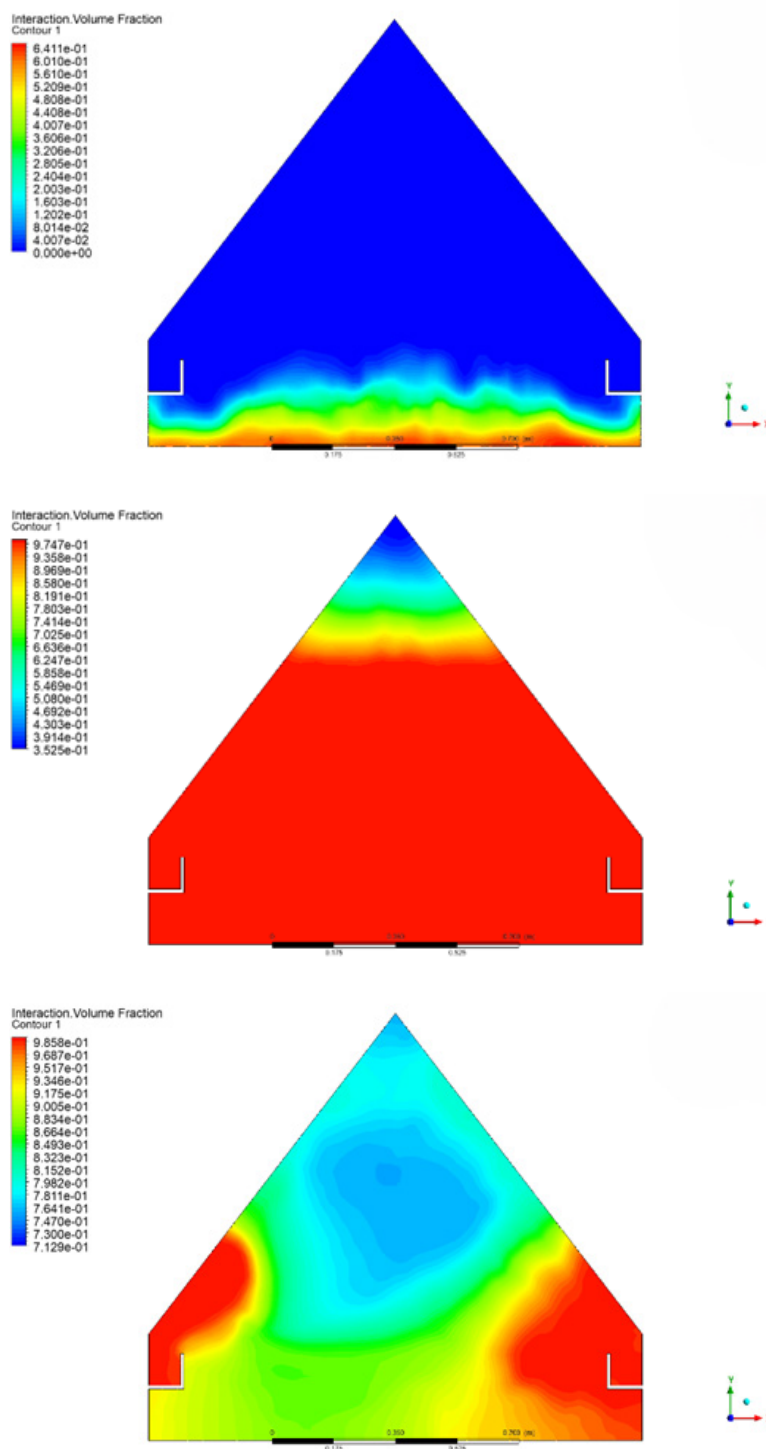
8-суретте қос көлбеу күн дистилляторының ортаңғы бөлігіндегі жылдамдық векторларының таралуы көрсетілген. Бірінші рет қадамында, дәл 5-суреттегідей, векторлардың жоғары бағытталғаны анық, өйткені су буы дистиллятордың ең жоғары нүктесіне, бұрыштық бөлігіне көтеріледі. Су бетінің жанында қарқынды булану нәтижесінде пайда болатын күшті құйындылар пайда болғаны байқалады. Уақыттың бастапқы кезеңінде жылдамдық векторларының өрісі көрсетілген екі конфигурация үшін дерлік бірдей. 44-ші уақыт қадамында негізінен су бөліктеріне іргелес аумақтарда шоғырланған құрылымды құйындылардың қалыптасуы байқалады, бұл ретте ағынның жылдамдығы артады. 89-шы уақыт қадамында құйынды құрылымдар тұрақты күйге жетеді. Егер 89-шы уақыт қадамының нәтижелерін (5-сурет) бір көлбеу нұсқасымен салыстыратын болсақ, онда екі көлбеу нұсқадағы су буының әйнек бетіне шөгіп, қондырғының жоғарғы бұрыштық бөлігіне көтерілмейтінін көруге болады. Бұл екі

көлбеу дистиллятордағы жұмыс температурасының жоғары болуына байланысты. Екі көлбеу дистиллятордың жартысын талдағанда, векторлардың таралуы бір көлбеу конфигурацияға ұқсас екенін атап өтуге болады, тек нәтижелер бірнеше қадамға кейінге қалдырылады. Бұл қос көлбеу дистилляторды одан әрі зерттеу үшін симметриялы жүйені қабылдау арқылы есептеулерді жеңілдетуге болатынын көрсетеді.



Сурет 8 – Екі көлбеу күн дистилляторы үшін 1-ші, 44-ші және 89-шы уақыт қадамдарындағы жылдамдық векторларының өрісі

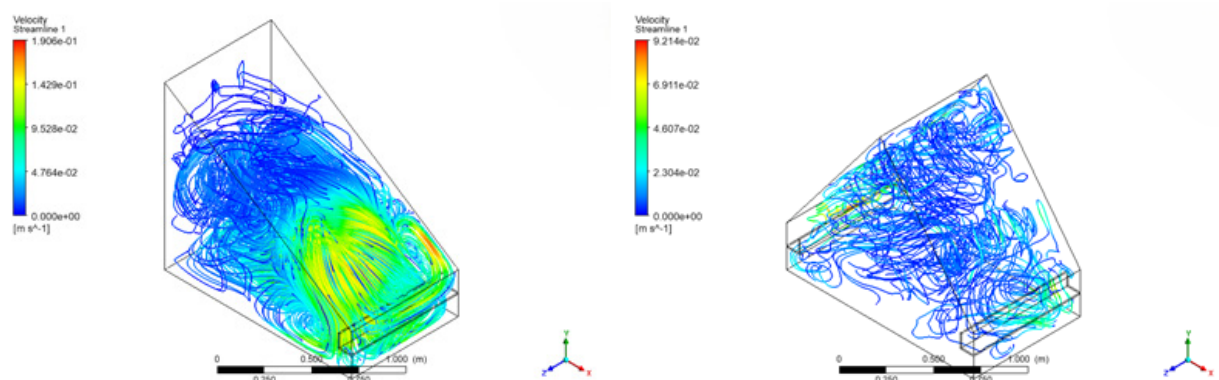
9-суретте екі көлбеу қондырғыдағы су буының көлемдік үлесінің уақыт бойынша таралуы көрсетілген. 6-суретте алғашқы қадамда көрсетілген сандық нәтижелермен салыстырғанда, 9-суретте алғашқы қадамындағы булану судың бүкіл бетінде біркелкі болады.



Сурет 9 – Екі көлбеу дистиллятор үшін 1-ші, 44-ші, 89-шы рет қадамдарындағы су буының көлемдік үлесі

Бұл екі көлбеу дистиллятордың әйнек бетінің арқасында күн радиациясының су бетіне және сәйкесінше сіңіргіш пластинаға біркелкі түсуімен түсіндіріледі. 44-ші уақыт қадамында, бір көлбеу корпустағы сияқты (6-сурет), екі көлбеу корпуста су буы дистиллятордың жоғарғы бұрыш бөлігін басып алуға ұмтылады. Ал 89-шы уақыт қадамында екі көлбеу корпусы үшін су буы дистиллятордың ең жоғарғы бұрышына көтерілмейді. Бұл құбылыс әйнек аймағының айтарлықтай үлкен болуымен түсіндіріледі, ал оның жылу өткізгіштігі жоғары. Нәтижесінде әйнек жанында суық ауа қабаты пайда болады, ол будың жоғары қарай жылжуына кедергі жасайды. Нәтижесінде бу тек температураның айтарлықтай артуы мүмкін жерлерде ғана шоғырланған.

10-суретте бір көлбеу және қос көлбеу дистилляторлар үшін модельдеудің соңғы сатысындағы ағын сызықтары көрсетілген. Бір көлбеу дистиллятор үшін анағұрлым айқын және ұйымдасқан құйынды құрылымдар байқалады, ал қос көлбеу дистиллятор үшін бу қозғалысы үлкен хаоспен және жылдамдықтың төмендеуімен сипатталады. Негізгі ағындар мен құйындылардың аймақтары су алатын бөліктердің жанында шоғырланған.



Сурет 10 – Бір және екі көлбеу дистилляторлар үшін 89-шы уақыт қадамындағы ағын сызықтары

Қорытынды

Екі күн қондырғысының конфигурациясын талдау қос көлбеу қондырғының бірқатар артықшылықтарға ие екенін көрсетті. Атап айтқанда, жоғары температура және будың көтерілуін тежейтін құйындардың аз болуы, нәтижесінде бүкіл бет бойынша біркелкі булануды қамтамасыз етеді. Бір еңісті қондырғы барлық кезеңдерде күшті құйындардың түзілуін көрсетеді, бұл булану процесін баяулатады, бірақ салқын климатқа қолайлы. Екі жағдайда да құйындар су қабылдайтын бөліктердің жанында шоғырланып, жүйенің термодинамикасына әсер етеді. Модельдің негізгі кемшілігі – 100 °C-тан төмен температурада булануды есепке алу үшін судың қайнау температурасын төмендету қажеттілігі, бұл реттелетін функцияларды қолдана отырып, одан әрі оңтайландыруды талап етеді. Нәтижесінде, қос еңісті конфигурация күн шуақты аймақтар үшін өнімдірек деп танылды, бірақ ондағы процестер ұзағырақ уақытты талап етеді.

Болашақ зерттеулерде әртүрлі температуралық жағдайларда булану үлгілерін оңтайландыруға баса назар аудара отырып, дистилляторлардағы термодинамикалық процестерді тереңірек зерттеу жоспарлануда. Атап айтқанда, 100 °C-тан төмен температурада булануды ескеретін дәлірек пайдаланушылық функцияларды енгізу бойынша жұмыстар жүргізіледі, бұл модельдеу дәлдігін арттырады. Сонымен қатар, әртүрлі материалдар мен дизайн ерекшеліктерінің дистилляторлардың тиімділігіне әсері зерттеледі, жылу беруді арттыру және жылу жоғалтуды азайту үшін балама жүйелерді талдау қарастырылады. Бұл әртүрлі климаттық жағдайларда күн дистилляторларының әртүрлі конфигурацияларының мүмкіндіктері мен шектеулерін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Авторлар Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжиниринг университетінің (Yessenov University) «Экология және геология» кафедрасына және жоба жетекшісі Самал Сырлыбекқызына жан-жақты қолдау мен осы зерттеуді жүзеге асыруға мүмкіндік берген ресурстар үшін шынайы алғысын білдіреді. Сіздердің ғылыми идеяларды дамытуға қосқан үлестеріңіз бен ұйымдастырушылық қолдауларыңыз баға жетпес болып, осы жобаның сәтті жүзеге асырылуында негізгі рөл атқарды.

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің гранттық қаржыландыруы аясында ИРН AP14871988 «Разработка солнечно-тепловой опреснительной установки на основе теплового насоса» жобасы бойынша жүргізілді.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Peter H. Gleick Water in crisis: a guide to the world's freshwater resources. – Oxford University Press, 1993. – 473 p.
- 2 Global Solar Atlas. URL: <https://globalsolaratlas.info/> (өтініш берілген күн 29.04.2024)
- 3 Abhay Agrawal, Rana R.S., Srivastava Pankaj K. Heat transfer coefficients and productivity of a single slope single basin solar still in Indian climatic condition: Experimental and theoretical comparison // Resource-Efficient Technologies. – 2017. – Vol. 3. – P. 466–482.
- 4 Khadim M. A. A. A., Abd AL-Awahid W.A., Hachim D.M. Review on the types of solar stills // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 928. – No. 022046.
- 5 Sampathkumar K., Arjunan T.V., Pitchandi P. Active Solar Distillation – A Detailed Review //Renew. Sustain. Energy Rev. – 2010. – No. 14. – P.1503–1526.
- 6 Rahul Dev, Tiwari G.N. Characteristic equation of a passive solar still // Desalination. – 2009. – Vol. 245. – P. 246–265.
- 7 Al-Karaghoulia A. A., Alnaserb W.E. Performances of single and double basin solar-stills // Applied Energy. – 2004. – Vol. 78. – P. 347–354.
- 8 Boubekria M., Chakerb A. Yield of an improved solar still: numerical approach // Energy Procedia. – 2011. – Vol. 6. – P. 610–617.
- 9 Mohamed Elashmawy An experimental investigation of a parabolic concentrator solar tracking system integrated with a tubular solar still // Desalination. – 2017. – Vol. 411. – P. 1–8.
- 10 Al-Doori G. F. L., Moosa I. S., and Saleh A. A. M. Enhanced productivity of double-slope solar still using local rocks // Int. J. Smart Grid Clean Energy – 2019. – Vol. 8(3) – P. 307–312.
- 11 Belyayev Ye., Mohanraj M., Jayaraj S. & Kaltayev A. Thermal performance simulation of a heat pump assisted solar desalination system for Kazakhstan climatic conditions // Heat Transfer Engineering. – 2018. – Vol. 40(12) – P. 1060–1072.
- 12 Elango C., Gunasekaran N., Sampathkumar K. Thermal modelsofsolarstill –A comprehensivereview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 47. – P. 856–911.
- 13 Vassilis B., Soteris K., Emmy D. Thermal Solar Desalination: Methods and Systems. – Academic Press, 2016. – 382 p.
- 14 Dunkle R.V. Solar water distillation: the roof type still and multiple effect diffusion still // International Developments in Heat Transfer, ASME, Proceedings of International Heat Transfer Conference, University of Colorado. – 1961. – Vol. 5 – P. 895–902.
- 15 Shukla S.K., Sorayan V.P.S. Thermal modeling of solar stills an experimental validation // Renewable Energy. – 2005. – Vol. 30. – P. 683–699.
- 16 Савельев И. В. Курс общей физики, т. 1. Механика. Молекулярная физика: Учебное пособие. – 2-е изд. перераб. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – С. 432.
- 17 Peter William Atkins, Julio De Paula, James Keeler Atkins Physical Chemistry. – Oxford University Press, 2018. – 908 p.
- 18 Richard C. T. The Principles of Statistical Mechanics. – Courier Corporation, 1979. – P. 660.

19 Yakubov S. & Cankurt B. & Maquil T. & Schiller P. & Abdel-Maksoud M. & Rung T. Euler-Euler and Euler-Lagrange approaches to cavitation modelling in marine applications // MARINE 2011 – Computational Methods in Marine Engineering. – 2011. – Vol. 4. – P. 544–555.

20 Yu Liu, Mikael Ersson, Heping Liu, Pär Jönsson, and Yong Gan Comparison of Euler-Euler Approach and Euler–Lagrange Approach to Model Gas Injection in a Ladle // Steel Research International. – 2019. – Vol. 90(5).

21 Amit Kumar CFD Modeling and Validation of a single slope Solar Still: Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Award of Degree of Master of Technology in Energy Engineering / Department of mechanical engineering, Malaviya national institute of technology. – Jaipur. – 2015. – 69 p.

22 ANSYS. Available online: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=///Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html

23 ANSYS Fluent software license, 23R2, ANSYS, Inc., Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.

REFERENCES

1 Peter H. Gleick. Water in crisis: a guide to the world's freshwater resources, (Oxford University Press, 1993), 473 p.

2 Global Solar Atlas. URL: <https://globalsolaratlas.info/> (date of access 29.04.2024)

3 Abhay Agrawal, R.S. Rana and Pankaj K. Srivastava (2017) Resource-Efficient Technologies, vol. 3, pp. 466–482. <https://doi.org/10.1016/j.refit.2017.05.003>

4 Mohammad Abd Al Amir Khadim, Wisam A. Abd AL-Awahid and Dhafer M. Hachim (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 928, no. 022046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/928/2/022046>.

5 Sampathkumar K., Arjunan T.V. and Pitchandi P. (2010) Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 14, no. 6, pp. 1503–1526. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.023>.

6 Rahul Dev and Tiwari G.N. (2009) Desalination, vol. 245, pp. 246–265. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.07.011>.

7 Al-Karaghoulia A.A. and Alnaserb W.E. (2004) Applied Energy, vol. 78, pp. 347–354. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00005-9).

8 Boubekria M. and Chakerb A. (2011) Energy Procedia, vol. 6, pp. 610–617. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.070>.

9 Mohamed Elashmawy (2017) Desalination, vol. 411, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.02.003>.

10 Al-Doori G.F.L., Moosa I.S., Saleh A.A.M. (2019) Enhanced productivity of double-slope solar still using local rocks, Int. J. Smart Grid Clean Energy, vol. 8 (3), pp. 307–312. <https://doi.org/10.12720/sgce.8.3.307-312>.

11 Belyayev Ye., Mohanraj M., Jayaraj S. and Kaltayev A. (2018) Heat Transfer Engineering, vol. 40(12), pp. 1060–1072. <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1451246>

12 Elango C., Gunasekaran N. and Sampathkumar K. (2015) Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 47, pp. 856–911. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.054>.

13 Vassilis B., Soteris K., Emmy D. Thermal Solar Desalination: Methods and Systems, (Academic Press, 2016), 382 p.

14 Dunkle R.V. (1961) International Developments in Heat Transfer, ASME, Proceedings of International Heat Transfer Conference, University of Colorado, vol. 5, pp. 895–902.

15 Shukla S.K. and Sorayan V.P.S. (2005) Renewable Energy, vol. 30, pp. 683–699. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.03.009>.

16 Savel'ev I.V. Kurs obshhej fiziki, vol. 1. Mehanika. Molekuljarnaja fizika: Uchebnoe posobie (Moscow: Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1982), P. 432. [in Russian]

17 Peter William Atkins, Julio De Paula, James Keeler Atkins, Physical Chemistry, (Oxford University Press, 2018), P. 908.

18 Richard C.T. The Principles of Statistical Mechanics (Courier Corporation, 1979), P. 660.

19 Yakubov S. & Cankurt B. & Maquil T. & Schiller P. & Abdel-Maksoud M. & Rung T. IV International Conference on Computational Methods in Marine Engineering (MARINE, 2011), p. 544–555.

20 Yu Liu, Mikael Ersson, Heping Liu, Pär Jönsson, and Yong Gan. Steel Research International, vol. 90(5), no. 1800494 (2019). <https://doi.org/10.1002/srin.201800494>

21 Amit Kumar (2015) CFD Modeling and Validation of a single slope Solar Still: Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Award of Degree of Master of Technology in Energy Engineering. Department of mechanical engineering, Malaviya national institute of technology, Jaipur, 69 p.

22 ANSYS. Available online: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=///Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html

23 ANSYS Fluent software license, 23R2, ANSYS, Inc., Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.

¹Karlina Ye.,

Master student, ORCID ID: 0009-0008-2941-5775,

e-mail: kelisaveta123@gmail.com

¹Yerdesh Ye.,

Master of Natural Sciences, ORCID ID: 0000-0001-9623-5610,

e-mail: yelnaryerdesh@gmail.com

^{1,2}Baimbetov D.,

Master of Natural Sciences, ORCID ID: 0000-0002-4992-0890,

e-mail: dynmuhambet@gmail.com

¹Jamakeyev I.,

Master student, ORCID ID: 0009-0005-9596-6944,

e-mail: jamakeyev.i@gmail.com

³Mohanraj M.,

Professor, ORCID ID: 0000-0003-4870-3496,

e-mail: mohanrajrac@yahoo.co.in

^{1,4*}Belyayev Ye.,

Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-7947-2179,

*e-mail: yerzhan.belyaev@kaznu.edu.kz; yerzhan.belyayev@gmail.com

¹Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Almaty, Kazakhstan

²Yessenov University, 130000, Aktau, Kazakhstan

³Department of Mechanical Engineering, Hindusthan College of Engineering and Technology,
641 032, Coimbatore, India

⁴Satbayev University, 050013, Almaty, Kazakhstan

NUMERICAL MODELING OF TWO-PHASE HEAT TRANSFER DURING EVAPORATION AND CONDENSATION INSIDE A SOLAR STILL

Abstract

This research presents a comparative analysis of two solar still configurations utilizing the ANSYS 2023R2 software package for computational fluid dynamics (CFD) simulations. The study employs the Volume of Fluid (VoF) model to simulate phase transitions between liquid and vapor, specifically focusing on vaporization processes. It is important to note that the VoF model used in this study primarily serves to visualize vaporization, with its numerical results aligning with theoretical expectations rather than providing practical applications. The relevance of this research is underscored by the global drinking water crisis, which drives the need to enhance the efficiency of desalination systems. Solar distillation is recognized as one of the most environmentally sustainable methods for producing clean water, making it an appropriate focus for this investigation. The primary objective of this work is to conduct a numerical analysis of the solar still, compare the performance of two different configurations, and evaluate potential modifications to improve the system's efficiency. The study simulates heat transfer processes within the distiller, the distribution of vapor volume fractions, and temperature variations over time. The findings indicate that the dual-slope configuration outperforms the single-slope configuration in terms of efficiency and productivity. Additionally, the research provides insights into the physical processes occurring within the distiller and identifies potential areas for further refinement of the system's modeling in ANSYS.

Key words: solar still, two-phase heat transfer, evaporation and condensation, ANSYS Fluent, numerical analysis.

¹Карлина Е.И.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0008-2941-5775,

e-mail: kelisaveta123@gmail.com

¹Ердеш Е.Б.,

магистр естественных наук, ORCID ID: 0000-0001-9623-5610,

e-mail: yelnaryerdesh@gmail.com

^{1,2}Баимбетов Д.Б.,

магистр естественных наук, ORCID ID: 0000-0002-4992-0890,

e-mail: dynmuhambet@gmail.com

¹Джамакеев И.Б.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0005-9596-6944,

e-mail: jamakeyev.i@gmail.com

³Моханрадж М.,

профессор, ORCID ID: 0000-0003-4870-3496,

e-mail: mohanrajrac@yahoo.co.in

^{1,4*}Беляев Е.К.,

ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-7947-2179,

*e-mail: yerzhan.belyaev@kaznu.edu.kz, yerzhan.belyayev@gmail.com

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби,

050040, г. Алматы, Казахстан

²Каспийский университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова,

130000, г. Актау, Казахстан

³Департамент инженерной механики Хиндустанского колледжа инженерии и технологий,

641 032, Коимбатор, Индия

⁴Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатбаева,

050013, г. Алматы, Казахстан

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИСПАРЕНИИ И КОНДЕНСАЦИИ ВНУТРИ СОЛНЕЧНОГО ДИСТИЛЛЯТОРА

Аннотация

В данной статье представлен сравнительный анализ двух конфигураций солнечного дистиллятора с использованием лицензированного программного комплекса ANSYS 2023R2 и метода вычислительной гидродинамики (CFD). Для моделирования применена модель VoF (Volume of Fluid), которая позволяет рассчитывать переход жидкости из одной фазы в другую. Следует отметить, что модель VoF способна воспроизводить процессы парообразования исключительно для визуализации, без практического применения численных результатов, что соответствует теоретическим ожиданиям. Актуальность исследования обусловлена глобальным кризисом питьевой воды, что требует повышения эффективности систем опреснения. Данный метод получения чистой воды является одним из наиболее экологически безопасных, что и стало основной причиной выбора объекта исследования. Целью работы является численный анализ и исследование солнечного дистиллятора, сравнительный анализ двух его конфигураций, а также оценка возможных модификаций для повышения эффективности установки. В ходе исследования были смоделированы тепловые потоки внутри установки, а также распределение объемной доли пара и изменение температуры во времени. Полученные результаты демонстрируют более высокую эффективность и производительность двухскатной конфигурации по сравнению с односкатной. Исследование также детализирует физические процессы, происходящие внутри установки, и определяет направления для дальнейшего совершенствования моделирования данной системы в ANSYS.

Ключевые слова: солнечный дистиллятор, двухфазный теплообмен, испарение и конденсация, ANSYS Fluent, численный анализ.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 13.09.2024