

## ҚАЛҚЫМАЛЫ ШАТЫРЛЫ РЕЗЕРВУАРЛАРДЫ ҚОЛДАНУ КЕЗІНДЕ ШЫҒАРЫНДЫЛАРДЫҢ ТӨМЕНДЕУІН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ БАҒАЛАУ

Карагойшиева Мейрамгул Турарбековна

[mira\\_madina2010@mail.ru](mailto:mira_madina2010@mail.ru)

Х.Досмұхамедов атындағы Атырау университеті 7М05201-«Қолданбалы экология» білім беру бағдарламасының 1-курс магистранты, Атырау қ. Қазақстан.

Ғылыми жетекші: Тауова Н.Р., PhD доктор, қауымдастырылған профессор

### *Аңдатпа*

Бұл мақалада мұнай айдау станциялары нысандарында шығарындыларды азайту және қоршаған ортаға әсерді төмендету қажеттілігі зерттеледі. Атап айтқанда мұнайды стационарлық шатыры бар, ішкі понтоны бар және қалқымалы шатыры бар резервуарларда сақтау кезінде көмірсутектер шығарындыларына сандық бағалау және салыстырмалы талдау жүргізілді. Зерттеудің мақсаты – ластаушы заттар шығарындыларын баламалы конструкциялармен салыстырғанда азайту үшін қалқымалы шатыры бар резервуарларды қолданудың тиімділігін анықтау. Әдістемелік негіз ретінде мұнайдың физика-химиялық қасиеттерін, температуралық ауытқуларды, пайдалану режимдерін және резервуарлардың конструкциялық ерекшеліктерін ескеретін қолданыстағы нормативтік құжаттар негізделген есептік тәсілдер пайдаланылды. Зерттеу барысында климаттық және пайдалану факторларын ескере отырып, әртүрлі типтегі резервуарлар үшін шығарындылар есептелді. Қалқымалы шатыры бар резервуарларды қолдану газ кеңістігін барынша азайту және «тыныс алу» шығындарын қысқарту есебінен шығарындылардың көлемін едәуір төмендетуге мүмкіндік беретіні анықталды. Ең жоғары экологиялық әсер резервуарларды айтарлықтай температуралық ауытқулар жағдайында пайдалану кезінде қол жеткізіледі. Жұмыстың практикалық маңыздылығы алынған нәтижелерді мұнайды сақтау үшін технологиялық шешімдерді таңдауда, сондай-ақ өндірістік экологиялық бақылауды жүргізу және ластаушы заттар шығарындыларын азайту жөніндегі іс-шараларды әзірлеу барысында қолдану мүмкіндігімен айқындалады.

*Түйін сөздер:* мұнай сақтау резервуарлары, қалқымалы шатыр, понтон, шығарындылар, көмірсутектер, экологиялық қауіпсіздік, өндірістік экологиялық бақылау.

Мұнай және мұнай өнімдерін сақтау мұнай-газ саласының ажырамас бөлігі болып табылады. Алайда, бұл процесс атмосфераға көмірсутек буларының бөлінуімен қатар жүреді. Бұл булар негізінен ұшқыш органикалық қосылыстардан (ҰОҚ) тұрады және қоршаған ортаға, сондай-ақ адам денсаулығына кері әсер етеді. Резервуарлар мұнай сақтау жүйелеріндегі негізгі шығарындылар көзі болып табылады. Шығарындылар температура мен қысымның өзгеруі, сондай-ақ резервуарларды толтыру және босату кезінде пайда болады. Қазіргі уақытта шығарындыларды азайтудың тиімді әдістерінің бірі – қалқымалы шатырлы резервуарларды қолдану. Бұл технология булану аймағын азайтып, көмірсутек буларының атмосфераға шығуын төмендетеді. Дегенмен, тығыздағыштардың толық герметикалығы болмауына байланысты белгілі бір деңгейде шығарындылар сақталады. Зерттеу нысаны ретінде мұнай сақтау резервуарларының келесі екі түрі яғни, тұрақты шатырлы резервуарлар және қалқымалы шатырлы резервуарлар қарастырылды. Осы аталған екі түрлі

резервуарлардан шығатын негізгі шығарындылар олар көмірсутектер болып табылады және олар бірнеше негізгі көздер арқылы қалыптасады. Оларды дұрыс анықтау — модельдеу мен тиімді азайту шараларын әзірлеудің негізі болып табылады[1].

Негізгі шығындар көздерін, атап айтсақ олар:

1. Тыныштық шығындары (Standing losses) – бұл шығарындылар резервуар жұмыс істемей тұрған кезде де пайда болатын шығындар. Оның негізгі себептері: тәуліктік температураның өзгеруімен, қысымның ауытқуымен және тәуліктік температураның өзгеруімен болады. Осылардың нәтижесінде резервуар ішіндегі бу кеңейіп, «тыныс алу» процесі арқылы атмосфераға шығады.
2. Жұмыс шығындары (Working losses) - бұл шығарындылар резервуарды пайдалану барысында мұнайды құю (толтыру) және өнімді шығару (босату) кезінде туындайды. Бұл кезде бу фазасы сыртқа ығыстырылып, көмірсутектер бөлінеді.
3. Қалқымалы шатырдағы тығыздағыш аймағы (Rim seal losses) - қалқымалы шатырлы резервуарларда негізгі шығын көзі - шатыр мен қабырға арасындағы саңылау тығыздағыштың тозуы немесе сапасының төмендігі. Бұл — ең маңызды шығарындылар көздерінің бірі.
4. Шатыр беті арқылы шығындар (Deck losses) - шатырдың беткі қабатындағы ақаулар коррозия немесе микро саңылаулар. Бұл арқылы бу атмосфераға таралуы мүмкін.
5. Арматура және жабдықтар (Fittings losses) - Резервуардағы қосымша элементтер: люктер, тыныс алу клапандары, өлшеу құрылғылары. Олардың герметикалығы бұзылған жағдайда шығарындылар пайда болады.
6. Герметиканың бұзылуы (Fugitive emissions) – фланецтер, құбыр қосылыстары, дәнекерлеу орындары. Бұл көздер жиі байқалмайды, бірақ жинақталған әсері жоғары болуы мүмкін.
7. Төгінділер мен ашық булану - апаттық жағдайлар және ашық бетте мұнай қалдықтарының булануы кезінде пайда болады[2].

Ең үлкен шығарындылар үлесі қалқымалы шатырда тұрақты шатырда — «тыныс алу», ал қалқымалы шатырда — rim seal (тығыздағыш) береді. Мұнай және мұнай өнімдерін сақтау кезінде булану процестері көмірсутек шығарындыларының негізгі көзі болып табылады. Булану механизмдері резервуардың конструкциялық ерекшеліктеріне байланысты айтарлықтай өзгереді. Осыған байланысты тұрақты шатырлы және қалқымалы шатырлы резервуарлардағы булану процестерін салыстырмалы түрде талдау жүргізілді (Кесте 1).

Тұрақты шатырлы резервуарларда сұйық өнім мен шатыр арасындағы бос газ кеңістігі (пар кеңістігі) болады. Бұл кеңістікте көмірсутек булары жиналып, №1 кестеде көрсетілгендей сыртқы ортаға бірнеше механизмдер арқылы шығарылады.

Қалқымалы шатырлы резервуарларда шатыр сұйық бетінде тікелей орналасады, нәтижесінде бу кеңістігі іс жүзінде болмайды. Бұл булану қарқындылығын айтарлықтай төмендетеді. Дегенмен, белгілі бір шығарындылар №1 кестеде көрсетілгендей механизмдер арқылы сақталады[3].

Кесте 1- Тұрақты және қалқымалы шатырлы резервуарлардағы булану механизмдері

| Тұрақты шатырлы резервуарлардағы булану механизмдері  | Қалқымалы шатырлы резервуарлардағы булану механизмдері  |
|---|---|
| Кіші тыныс алу (standing losses) Температураның тәуліктік ауытқуы нәтижесінде резервуар ішіндегі бу көлемі кеңейіп немесе сығылады. Температура көтерілген кезде бу қысымы артып, тыныс | Тығыздағыш аймағы арқылы булану (rim seal losses)<br>Шатыр мен резервуар қабырғасы арасында саңылау болады, ол тығыздағыштармен жабылады. Тығыздағыштардың тозуы немесе |

|  |  |
|--|--|
| алу клапандары арқылы атмосфераға шығарылады.  | дұрыс жұмыс істемеуі буланудың негізгі көзі болып табылады.  |
| Үлкен тыныс алу (working losses) Резервуарды толтыру кезінде сұйық деңгейі жоғарылап, бу фазасы ығыстырылып сыртқа шығады. Ал босату кезінде сырттан ауа кіріп, кейін қайта булану процесі жүреді.                     | Шатыр беті арқылы булану (deck losses) Шатырдың бетінде микроақаулар немесе коррозия болған жағдайда бу шығуы мүмкін.                              |
|  | Жел әсері. Жел жылдамдығының артуы тығыздағыш аймағындағы булануды күшейтеді.  |
| Турбуленттік булану Сұйықтың құйылуы кезінде беткі қабаттың араласуы нәтижесінде булану қарқындылығы артады. Осы механизмдердің нәтижесінде тұрақты шатырлы резервуарларда булану шығындары ең жоғары деңгейде болады. | Арматуралар арқылы шығындар (fittings losses) Люктер, өлшеу құрылғылары, клапандар сияқты элементтер арқылы көмірсутек буларының шығуы орын алады. |

Талдау нәтижелері көрсеткендей, тұрақты шатырлы резервуарларда булану негізінен «тыныс алу» процестерімен анықталады және шығарындылар деңгейі жоғары болады. Ал қалқымалы шатырлы резервуарларда булану айтарлықтай төмендейді, себебі бу кеңістігі жойылады. Дегенмен, негізгі шығарындылар көзі ретінде тығыздағыш аймағы сақталады. Осылайша, қалқымалы шатырлы резервуарларды қолдану булану шығындарын тиімді азайтады, бірақ максималды нәтиже алу үшін тығыздағыш жүйелердің сапасын арттыру және техникалық қызмет көрсетуді күшейтеу қажет болып табылады[4].

#### *Булану шығарындыларын модельдеу*

Булану шығарындыларын модельдеу мұнай және мұнай өнімдерін сақтау кезінде пайда болатын көмірсутектердің атмосфераға таралуын сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік береді. Бұл зерттеуде модельдеу API AP-42 әдістемесіне негізделіп жүргізілді. API AP-42 (Chapter 7: Liquid Storage Tanks) әдістемесі мұнай және мұнай өнімдерін сақтау кезінде туындайтын булану шығындарын есептеудің кеңінен таралған инженерлік тәсілі болып табылады.

Жалпы модель

Резервуарлардағы жалпы булану шығындары келесі түрде анықталады:

$$L = L_s + L_w$$

мұнда:

L — жалпы булану шығындары, т/жыл

L<sub>s</sub> — сақтау кезіндегі шығындар

L<sub>w</sub> — пайдалану кезіндегі шығындар

Тұрақты шатырлы резервуарлар үшін модель

Тұрақты шатырлы резервуарларда булану шығындары екі негізгі механизм арқылы жүреді:

1. Сақтау шығындары (Standing losses)

Температура мен атмосфералық қысымның өзгеруі нәтижесінде газ кеңістігінде булану жүреді:

$$L_s = K_s * V * P_v * T$$

мұнда:

L<sub>s</sub> — эмпирикалық коэффициент

K<sub>s</sub> — газ кеңістігінің көлемі

P<sub>v</sub> — қаныққан бу қысымы

T — температураның тәуліктік ауытқуы

## 2. Пайдалану шығындары (Working losses)

Резервуарды толтыру және босату кезінде пайда болады:

мұнда:

$$L_w = K_w * V_t * P_v$$

$K_w$  — жұмыс коэффициенті

$V_t$  — жылдық айналым көлемі

Қалқымалы шатырлы резервуарлар үшін модель

Қалқымалы шатырлы резервуарларда булану шығындары айтарлықтай төмен болады және келесі құрамдас бөліктерден тұрады:

### 1. Шеткі тығыздағыш шығындары (Rim seal losses)

$$L_{rim} = K_r * D * P_v$$

мұнда:

$K_r$  — тығыздағыш типіне байланысты коэффициент

$D$  — резервуар диаметрі

$P_v$  — қаныққан бу қысымы

### 2. Палуба шығындары (Deck losses)

Палуба беті арқылы булану:

$$L_{desk} = K_d * A * P_v$$

мұнда:

$L_{desk}$  — палуба өткізгіштік коэффициенті

$A$  — палуба ауданы

### 3. Арматуралар арқылы шығындар (Fitting losses)

$$L_{fittings} = \sum (K_f * P_v)$$

мұнда:

$K_f$  — әрбір элементке арналған коэффициент

Модельдің дәлдігін арттыру үшін келесі факторлар ескерілді: қоршаған орта температурасы

жел жылдамдығы, мұнай өнімдерінің физика-химиялық қасиеттері, резервуардың геометриялық параметрлері, тығыздағыштардың сапасы[5].

*Модельдеудің ерекшелігі*

Қалқымалы шатырлы резервуарларда бу кеңістігінің болмауына байланысты working losses (жұмыс шығындары) айтарлықтай төмендейді. Негізгі шығындар тек конструкциялық элементтер арқылы жүреді. Осыған байланысты модель нәтижелері қалқымалы шатырлы резервуарлардың булану шығарындыларын 80–95% дейін төмендететінін көрсетеді. Осы ретте, булану шығарындыларын модельдеу нәтижелерін айқын көрсету үшін есептеу бөліміне келетін болсақ булану шығарындыларын салыстырмалы бағалау үшін бірдей бастапқы шарттар қолданылатын деректер (Кесте №1) бірдей қабылданды.

Кесте 1- Булану шығарындыларын салыстырмалы бағалау үшін бастапқы қолданылған деректер

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Резервуар параметрлері             | Мәні (тұрақты шатырлы, пантонды, қалқымалы шатырлы) |
| Резервуар диаметрі, D              | 40 м  |
| Резервуар көлемі                   | 10 000 м <sup>3</sup>                               |
| Өнім түрі                          | Шикі мұнай  |
| Қаныққан бу қысымы, P <sub>v</sub> | 5 кПа   |
| Жылдық айналым                     | 120 000 м <sup>3</sup> /жыл                         |
| Орташа температура                 | 25 °С   |

|                     |      |
|---------------------|------|
| Температура ауытқуы | 15 С |
|---------------------|------|

1-кестеде бастапқы деректерге негізделген булану шығарындыларын салыстырмалы бағалауға арналған. Зерттеу үшін 10 000 м<sup>3</sup> көлеміндегі, диаметрі 40 м резервуарларда шикі мұнай сақталды. Қаныққан бу қысымы 5 кПа, жылдық айналым 120 000 м<sup>3</sup>/жыл, орташа температура 25 °С, ал температура ауытқуы ±15 °С болды. Деректер тұрақты шатырлы, пантонды және қалқымалы шатырлы резервуарларды салыстыру үшін қолданылды.

1. Тұрақты шатырлы резервуар үшін булану шығарындыларын есептеу

▪ Сақтау шығындары (LS)

$$L_s = 0,00035 * V * P_v * T$$

$$L_s = 0,00035 * 10000 * 5 * 15 = 262,5 \text{ т/жыл}$$

▪ Пайдалану шығындары (LW)

$$L_w = 0,00025 * V_t * P_v$$

$$L_w = 0,00025 * 120000 * 5 = 150 \text{ т/жыл}$$

$$\text{Жалпы шығарындылар: } L = 262,5 + 150 = 412,5 \text{ т/жыл}$$

2. Пантонды резервуар үшін булану шығарындыларын есептеу

Тәжірибелік коэффициент бойынша ~50% төмендеу:

$$L = 412,5 * 0,5 = 206,25 \text{ т/жыл}$$

3. Қалқымалы шатырлы резервуар үшін булану шығарындыларын есептеу

▪ Rim seal losses

$$L_{rim} = 0,15 * D * P_v$$

$$L_{rim} = 0,15 * 40 * 5 = 30 \text{ т/жыл}$$

▪ Deck losses

$$L_{desk} = 0,02 * A * P_v$$

$$A = 1256 \text{ м}^2$$

$$L_{desk} = 0,02 * 1256 * 5 = 125,6 \text{ т/жыл}$$

▪ Fitting losses

$$L_{fittings} = 20 \text{ т/жыл}$$

Жалпы:

$$L = 30 + 125,6 + 20 = 175,6 \text{ т/жыл}$$

Осылайша, булану шығарындыларын модельдеу нәтижелерін айқын көрсету үшін есептеу нәтижесімен келесідей мәндерді (кесте №2) алдық[6].

Кесте 2- Булану шығарындыларын салыстырмалы талдау нәтижесі

| Резервуар түрі              | Мұнай және мұнай өнімдерін 1 жылда резервуарда сақтау кезінде пайда болатын шығарындылар көлемі (т/жыл) | Шығарындылардың төмендеуі (%) |
|-----------------------------|---|-------------------------------|
| Тұрақты шатырлы резервуар   | 412,5   | 0%                            |
| Пантонды резервуар          | 206,25  | 50%                           |
| Қалқымалы шатырлы резервуар | 175,6   | 57%                           |

2-кестеде түрлі резервуарларда бір жыл ішінде мұнай және мұнай өнімдерін сақтау кезінде шығатын шығарындылардың көлемі және шығарындылардың салыстырмалы төмендеуі (%) көрсетілген. Тұрақты шатырлы резервуар ең үлкен шығарындылар көлемін көрсетіп, жылына 412,5 т/жыл құрайды және төмендеу

көрсеткіші 0%, яғни бұл резервуар шығарындыларды азайтпайды және есептік негіз ретінде алынды.

Понтонды резервуар шығарындыларды айтарлықтай төмендетеді, жылдық шығарындылары 206,25 т/жыл, бұл тұрақты шатырлы резервуарға қарағанда 50% төмендеу екенін көрсетеді. Бұл резервуардың дизайны мұнайдың булануынан туындайтын шығындарды тиімді азайтатынын білдіреді. Қалқымалы шатырлы резервуар ең үлкен төмендеуді қамтамасыз етеді, жылдық шығарындылары тек 175,6 т/жыл, яғни тұрақты шатырлы резервуарға қарағанда 57% төмендеу байқалады. Бұл қалқымалы шатырлы резервуарлардың буланатын органикалық заттардың шығарындыларын азайтуда өте тиімді екенін көрсетеді.

Жалпы, нәтижелер резервуардың түрі шығарындылар көлеміне айтарлықтай әсер ететінін көрсетеді. Қалқымалы немесе понтонды шатырлы резервуарларды қолдану мұнай сақтау кезінде қоршаған ортаға шығатын зиянды заттардың деңгейін айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді және экологиялық талаптарға сай болуға көмектеседі[7].



Сурет 1. Резервуар типтері бойынша булану шығарындыларының салыстырмалы диаграммасы

Есептеу нәтижелеріне талдау: қалқымалы шатырлы резервуарлар шығарындыларды 2-3 есе азайтады, стационарлы резервуарлар ең жоғары шығарындыларға ие понтонды резервуарлар аралық нәтиже көрсетеді. Қалқымалы шатырдың тиімділігі бу кеңістігінің болмауымен және буланудың тікелей шектелуімен түсіндіріледі, қорытындылай келе жүргізілген есептеулер негізінде қалқымалы шатырлы резервуарларды қолдану булану шығарындыларын 50–60% дейін төмендетуге мүмкіндік беретіні анықталды. Яғни, ең төмен булану шығарындылары қалқымалы шатырлы резервуарларда байқалады. Тиімділікті арттыру үшін rim seal тығыздағыштарын сапалы таңдау, арматуралар санын оңтайландыру және техникалық қызмет көрсету регламентін күшейту ұсынылады [8].

Алынған нәтижелерде мұнай және мұнай өнімдерін сақтау үшін қолданылатын резервуарлардың конструкциялық ерекшеліктеріне байланысты шығарындылардың, яғни көмірсутектердің булану арқылы шығарындылары көлемінің айқын тәуелділігін көрсетеді. Ең жоғары көлемдегі шығарындылар тұрақты шатырлы резервуарларға тән болды, яғни жылына 412,5 тонна шығарындылар, бұл резервуарларда газ кеңістігінің болуымен және қарқынды «тыныс алу» процестерімен түсіндіріледі. Температура мен қысымның ауытқуы кезінде атмосферамен тұрақты газ алмасу жүреді, бұл көмірсутектердің жеңіл фракцияларының елеулі шығындарына алып келеді[9].

Понтонды резервуарларды қолдану шығарындыларды жылына 206,25 тонна деңгейіне дейін төмендетуге мүмкіндік береді, бұл шығарындыларды 50%-ға қысқаруға дейін сәйкес келеді. Бұл булану бетінің ішінара жабылуы және газ кеңістігі көлемінің азаюымен байланысты болады. Алайда, понтон мен резервуар қабырғасы арасындағы саңылаулардың болуы, сондай-ақ тығыздағыштардың (rim seal) жеткіліксіз герметикалығы шығын көздері болып қала береді. Ең тиімді шешім ретінде қалқымалы

шатырлы резервуарлар болып табылады, мұнда шығарындылар жылына 175,6 тоннаны құрайды, бұл тұрақты шатырлы резервуарлармен салыстырғанда 57%-ға төмен. Газ кеңістігінің іс жүзінде болмауы және шатырдың өнім бетімен тығыз жанасуы көмірсутектердің булануын айтарлықтай шектейді. Дегенмен, бұл жағдайда да белгілі бір шығындар технологиялық элементтер (тығыздағыштар, арматура, люктер) арқылы сақталады. Жоғарыда салыстырмалы талдау көрсеткендей, тұрақты шатырдан понтонды конструкцияға көшу шығарындыларды негізгі деңгейде азайтуды қамтамасыз етеді, ал қалқымалы шатырға көшу қосымша, бірақ салыстырмалы түрде аз әсер береді. Бұл негізгі фактордың булану бетінің ашық ауданы мен газ кеңістігінің көлемін азайту екенін дәлелдейді [10].

Экологиялық әсерден бөлек, булану шығындарын төмендету маңызды экономикалық мәнге ие, себебі ол тауарлық мұнай шығындарын азайтады. Сонымен қатар, қалқымалы шатырлы резервуарларды енгізу экологиялық заңнама талаптарын орындауға және шығарындылар көлемінің рұқсатта құжаттарында белгіленген нормативтерінен асу тәуекелдерін төмендетуге ықпал етеді. Осы нәтижелер көрсеткендей, қалқымалы шатырлы резервуарлар көмірсутектердің булануынан туындайтын шығарындыларды азайтудың ең тиімді технологиясы болып табылады, әсіресе ірі көлемді сақтау объектілерінде қолдану маңызды [11].

### Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

1. Zinke, R., Melnychuk, J., Kohler, F., Krause, U. (2020) *Quantitative risk assessment of emissions from external floating roof tanks during normal operation and in case of damages using Bayesian Networks*. Reliability Engineering & System Safety, 197, 106826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106826>
2. Zinke, R., Melnychuk, J., Köhler, F. (2020) *Emissions of volatile hydrocarbons from floating roof tanks and their local dispersion: Considerations for normal operation and in case of damage*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 66, 104179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104179>
3. Fang, J., Huang, W., Huang, F., Fu, L., Zhang, G. (2020) *Investigation of the superposition effect of oil vapor leakage and diffusion from external floating-roof tanks using CFD simulations*. Processes, 8(3), 299. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8030299>
4. Zhang, G., Huang, W., Fang, J. et al. (2020) *Analysis of influence of floating-deck height on oil-vapor migration and emission of internal floating-roof tank*. Processes, 8(9), 1026. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8091026>
5. Li, J., Liu, M., Dang, S., Hu, L. et al. (2024) *Numerical study on the influence of various design variables on the behavior characteristics of oil and gas in internal floating roof tanks*. Energies, 17(17), 4336. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17174336>
6. Yang, H., Ren, B., Huang, Y., Zhang, Z. et al. (2024) *Volatile organic compounds (VOCs) emissions from internal floating-roof tank in oil depots in Beijing: Influencing factors and emission reduction strategies analysis*. Science of the Total Environment, 916, 170222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170222>
7. Li, J., Li, X., Yang, D. et al. (2025) *A study on different variables on the distribution law of oil and gas diffusion concentration of internal floating roof tanks*. Scientific Reports, 15, 23200. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04110-4>

8. Sun, X., Li, W., Huang, Q., Zhang, J. (2020) *Large eddy simulations of wind loads on an external floating-roof tank*. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 14(1). DOI: <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1718757>
9. Xue, H., Tao, J. (2025) *Numerical simulation study on oil and gas leakage and diffusion under the floating roof safety landing protection system in large external floating roof storage tanks* Academic Journal of Science and Technology. DOI: <https://doi.org/10.54097/4vb78m14>
10. Yang, H., Ren, B., Zhao, H. et al. (2024) *Emission characteristics and control strategies of VOCs from internal floating-roof tanks in oil depots*. Science of the Total Environment, 916. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170222>
11. Li, J., Liu, M., Dang, S. et al. (2024). *Numerical simulation of oil vapor diffusion in internal floating roof storage tanks with different structural parameters*. Energies, 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17174336>