

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**МЕДВЕДЄВ СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ**



УДК 62-82:681.587.34

**ПРОЕКТУВАННЯ ВАКУУМНИХ СИСТЕМ ВИДАЛЕННЯ ВІДХОДІВ  
ПАСАЖИРСЬКИХ ЛІТАКІВ**

05.07.02 – проектування, виробництво  
та випробування літальних апаратів

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на Державному підприємстві «АНТОНОВ» та в Національному авіаційному університеті, Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Бадах Валерій Миколайович,**  
Національний авіаційний університет  
Міністерства освіти і науки України,  
завідувача кафедри гідро - газових систем

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Козлов Леонід Геннадійович,**  
Вінницький національний технічний університет  
Міністерства освіти і науки України,  
завідувач кафедри технологій та автоматизації машинобудування

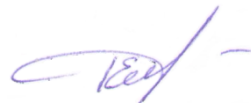
кандидат технічних наук, доцент  
**Турик Володимир Миколайович,**  
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”  
Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри прикладної гідроаеромеханіки та мехатроніки ММІ

Захист відбудеться “ 18 ” березня 2021 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України за адресою 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1, корпус 11, ауд. 220.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06,  
кандидат технічних наук, с.н.с.



О.Ю. Корчук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність дослідження.** Проектування сучасного літака і його систем складний ітераційний процес, який, спрямований на пошук оптимального співвідношення різних факторів, основними з яких є забезпечення: економічності, безпеки, регулярності польотів; також забезпечення ресурсу, експлуатаційної технологічності, вартості виробництва та ін. Постійне підвищення вимог до конструкції літаків і його систем, їх ускладнення та автоматизація, посилення конкуренції між розробниками, призводять до розробки нових та істотної модернізації існуючих систем, що як наслідок впливає на процеси проектування (в тому числі на такі чинники як вартість та час розробки) і потребує їх вдосконалення.

Одним із факторів, що впливають на комерційну привабливість літака, є готовність надати пасажиром максимальний рівень комфорту, який, крім вимог до ергономіки та естетики, також включає забезпечення необхідних умов життєдіяльності людини. Поміж таких систем, що підтримують необхідний рівень комфорту, є система видалення відходів (СВВ), яка призначена для задоволення фізіологічних потреб людини на борту літака.

У теперішній час у цивільній авіації застосовують різні типи СВВ: касетні (виносні), рециркуляційні та вакуумні. Серед приведених все більш широке поширення набуває СВВ вакуумного типу (або водо-вакуумного типу) в зв'язку з їх економічністю, екологічністю, комфортом.

Вакуумні технології широко представлені в різних галузях народного господарства. Проте, в порівнянні з іншими в авіаційній промисловості до систем пред'являють/висувають значно жорсткіші вимоги з безпеки, вагових характеристик, рівню інтеграції з системами літака, а також забезпеченню безвідмовного функціонування при різних факторах, які мають вплив на систему (тиску, температури, вібрація, вплив блискавки та ін.)

Існуючі методи, концепції і підходи проектування систем є, як правило, вузькоспеціалізованими, та не враховують особливостей проектування СВВ для літака, або носять узагальнений характер і можуть бути використані лише частково. Наявні у літакобудівних фірм методи і підходи до проектування СВВ є службовою або конфіденційною інформацією і не публікуються у відкритих джерелах.

Складність проектування СВВ, також пов'язана з недостатнім дослідженням процесів, що протікають в елементах системи і мають вплив на вибір конструктивних параметрів елементів системи, а також їх зонування у відсіках літака. Так, на теперішній час, відсутні математичні моделі нестационарних процесів, що описують рух двофазного середовища повітря - відходи в основних елементах системи, а саме в трубопроводах збору відходів і баку їх зберігання, в наслідок чого потрібні конструктивні параметри елементів системи визначаються в випробуваннях на натурних стендах. При зміні вихідних даних літака (розміру літака, кількості пасажирів, часу польоту і т.д.) це

призводить до реконфігурації стенду СВВ і проведення повторного циклу випробувань.

У зв'язку з викладеним, актуальною науково-прикладною задачею є створення методик проектування та розрахунку СВВ вакуумного типу, в результаті чого стане можливим: вибір засобів і методів проектних досліджень; визначення основних концептуальних положень і принципів побудови системи; визначення переліку необхідних нормативних документів; визначення об'єму та комплексу програмних та технічних засобів розрахунку системи.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана в рамках національної програми створення пасажирського літака нового покоління Ан-148 ( «Державна комплексна програма розвитку авіаційної промисловості України на період до 2010 року» затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 12.12.2001 р №1665-25). План науково-дослідних робіт та науково-дослідних робіт та заходи щодо впровадження нових технологій та техніки у виробництві ДП «Антонов» на 2019-2020 роки (Підстава: Наказ № 3389 від 30.11.2018 року).

Основні дослідження виконані на ДП «Антонов» в рамках експериментальних і науково - дослідних робіт зі створення літака типу Ан-148 і його модифікацій в 2004 - 2011 років, і були виконані під керівництвом автора. Експериментальні дані отримані на дослідній базі фірми Monogram Systems США, Лос-Анджелес, м. Карстон - дослідження газо-гідродинамічних процесів в баку відходів; на дослідній базі Державного підприємства «Антонов» - комплексні льотні випробування системи видалення відходів у складі літака.

### **Мета і задачі дослідження.**

Мета дослідження - розробка методик проектування та розрахунку системи видалення відходів, для прийняття обґрунтованих проектно-конструкторських та технологічних рішень, вибору оптимальних параметрів системи.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані наступні задачі:

1. Виконати аналіз існуючих принципів та підходів до проектування систем літака і зокрема системи видалення відходів, визначити критерії та вимоги до їх розробки СВВ, виконати аналіз літературних джерел по темі дослідження.

2. Розробити методики проектування та розрахунку системи видалення відходів, що враховує особливості проектування та оцінку основних характеристик на різних етапах створення системи, визначити основні концептуальні положення і принципи побудови та розрахунку системи.

3. Розробити математичну модель процесу двофазної течії повітря-відходи в трубопроводі СВВ.

4. Розробити модель, що описує газо-гідродинамічні нестационарні процеси при вакуумізації і наповненні баку відходів, яка дозволить визначати необхідні дані для проектування баку відходів.

5. Розробити розрахунковий комплекс для виконання комплексного розрахунку вакуумної системи видалення відходів літака.

6. Перевірити адекватність розроблених розрахункових моделей за допомогою порівняння результатів розрахунків з даними отриманими на експериментальному стенді і дослідному літаку.

**Об'єктом дослідження** є процеси проектування вакуумних систем видалення відходів встановлених на літаку.

**Предметом дослідження** є методики проектування та розрахунку вакуумних систем видалення відходів встановлених на літаку.

**Методи дослідження.**

У роботі застосовувалися методи проектування систем на основі системного підходу, що включають методи декомпозиції, аналогії, аналізу і синтезу. Теоретичні дослідження засновані на побудові математичних моделей газодинамічних процесів в трубопроводах і баку відходів системи, з використанням чисельних методів моделювання, та комп'ютерного моделювання.

Експериментальні дослідження проведені на спеціально спроектованих стендах, та дослідному літаку методом спостереження, візуального контролю, фото і відео фіксації отриманих результатів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

1. Вперше запропонована і апробована методика проектування СВВ вакуумного типу для пасажирських літаків для систематизації та ієрархічного представлення і враховує особливості процесу проектування системи.

2. Вперше запропоновано методику та комплекс програмних і технічних засобів розрахунку СВВ вакуумного типу для пасажирських літаків, що забезпечує отримання повних і якісних характеристик при проектуванні системи.

3. Вперше розроблена математична модель, що описує квазістаціонарні гідравлічні процеси двофазної течії у трубопроводах системи видалення відходів для отримання газодинамічних характеристик трубопроводу, на основі яких визначаються вагові та габаритні параметри трубопроводів системи.

4. Вперше на основі математичної моделі процесу взаємодії двофазового середовища відходи-повітря, розділеного вільною поверхнею, яка реалізована за допомогою програмного забезпечення Ansys CFX, отримані характеристики вакуумування та наповнення баку зберігання відходів, що дозволило визначити залежність допустимої мінімальної висоти повітряного зазору між поверхнею відходів і верхньою стінкою баку, яка в свою чергу дозволяє визначити повний об'єм баку і його подальше компонування у складі літака.

**Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблені методики проектування та розрахунку СВВ вакуумного типу для пасажирських літаків.

2. Розроблена математична модель течії відходів у трубопроводах системи видалення відходів для отримання газодинамічних характеристик трубопроводу.

3. На основі математичної моделі, яка реалізована за допомогою програмного забезпечення Ansys CFX отримані характеристики вакуумування та наповнення баку зберігання відходів.

Результати роботи успішно впроваджені у виробничу практику на ДП «Антонов» і апробовані при розробці системи видалення відходів для літаків сімейства Ан-148-100 і його модифікацій (серійно експлуатованих), що підтверджується актом впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані автором самостійно. В опублікованих роботах автору належить: [1] – розглянуто розвиток систем видалення відходів та водопостачання і виконано огляд систем; [6] – запропонована методика проектування системи видалення відходів яка дозволяє систематизувати процес проектування, виконати оцінку обсягу робіт за проектом і окреслити весь необхідний обсяг розрахунків для отримання характеристик системи; [7] – досліджено процеси вакуумізації та наповнюваності баку зберігання відходів чисельним методом та виведено залежність допустимої мінімальної висоти повітряного зазору між поверхнею відходів до верхньої стінки бака від діаметра баку.

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить: [2] розробка моделі та зонування трас трубопроводів, розробка випробувального устаткування і обробка експериментальних даних; [3] – аналіз і вибір моделі проектування основних конструктивних параметрів трубопроводів; [4] – запропоновано й обґрунтовано розробку моделі баку зберігання відходів; виконано дослідженні процесу наповнюваності баку, методами чисельного моделювання з використанням програмного забезпечення Ansys CFX та запропонована схеми стенда для натурних випробувань баку відходів; [5] – запропоновано математичну модель процесу двофазної течії у трубопроводах системи видалення відходів для отримання газодинамічних характеристик трубопроводу.

**Апробація.** Основні результати досліджень, що включені у дисертацію, докладались та обговорювались на конференції: науково - технічних конференції «Промислова гідравліка і пневматика» (IV (2003 р.), XX (2019 р.) - НАУ. – м Київ; VI (2005 р.), - Національний університет «Львівська політехніка». – м. Львів, , VII - НТТУ «КПІ». – м. Київ, 2006 р., VIII (2007 р.), XI (2010 р.)- Таврійський державний агротехнічний університет. – м. Мелітополь, IX - Державний політехнічний університет ім. М. Остроградського. – м. Кременчук, 2008 р., X (2009 р.), XIX (2018 р.) - Національний лісотехнічний університет України. – м. Львів, , XII - Донецький Національний університет. – м. Донецьк, 2011 р., XIII - Чернігівський державний технологічний університет. – м. Чернігів, 2011 р., XIV - Одеський Національний політехнічний університет. – м. Одеса, 2013 р.; міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», Чернігівський національний технологічний університет. – м. Чернігів (VIII - 2018 р., IX - 2019 р., X - 2020 р.); XXVII Міжнародна науково-практична конференція MicroCAD-2019 «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – м. Харків, 2019 р.

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи і її результати відображені в опублікованих наукових працях. Всі теоретичні та практичні результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи і виносяться на захист, отримані автором самостійно. За результатами досліджень опубліковано 17 наукових праць, з яких: 6 статей у наукових фахових виданнях, що входять до переліку фахових видань ДАК МОН України (в т.ч. і в журнали, індексовані в

міжнародних наукометричних базах даних) 1 робота у періодичному науковому виданні США і 10 матеріалів тез доповідей на наукових конференціях.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Загальний обсяг дисертації 153 сторінки, з яких основний зміст роботи викладено на 113 сторінках. Дисертація містить 60 рисунків і 3 таблиці. Список використаних джерел включає 101 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** розкрита актуальність теми дисертаційної роботи, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовані цілі та завдання дослідження і методи їх досягнення, визначена наукова новизна і практична цінність отриманих в роботі результатів. Наводяться відомості про особистий внесок здобувача, публікаціям, апробації отриманих залежностей, структурі, обсягом і отриманих результатах роботи.

**У першому розділі** представлено аналіз методів і підходів до проектування систем на підставі матеріалів наступних авторів: С.М. Єгер, А.Л. Гиммельфарб, Е.Торенбік, Дж.К. Джонс, Д. Р. Раймлер, А.Д. Холл, В.І. Миколаїв, В.Н. Романов та інших, який показав, що запропоновані методики описують методи проектування і їх застосування, які є затребуваним і необхідним для реалізації підходів до проектування систем, зокрема системи видалення відходів, але не достатньо деталізовані і не охоплюють реальний об'єм та порядок проектування конкретної системи. З урахуванням розвитку сучасних технологій і методів проектування, вимог до систем, вони не здатні всебічно висвітлити методику проектування окремої системи.

Розглянуто загальні питання і особливості проектування літака і його систем, проведено аналіз існуючих в даний час СВВ, виконаний аналіз різних типів систем видалення відходів гравітаційних (виносних, рециркуляційних) вакуумних, їх принципів роботи, схемних рішень, а також виконано порівняльний аналіз систем.

На основі проведеного аналізу обґрунтована актуальність, мета та задачі дослідження.

**У другому розділі** запропоновано методику проектування СВВ, яка реалізує завдання синтезу системи (визначення варіанту системи, виходячи із заданих властивостей), аналізу системи в якій досліджуються властивості і особливості системи, побудови варіантів системи (прийняття рішення).

Роботи з проектування систем літака починаються після завершення прикладних науково-дослідних робіт (аналізу здійсненності) за умови позитивних результатів економічного аналізу, який задовольняє розробника з точки зору її цілей, ресурсів і ринкових умов, технічних і технологічних можливостей, визначення компетенції, отримання висновку про необхідність розробки об'єкта і вироблення попередніх загальних даних про майбутній об'єкт.

На етапі макропроектування (зовнішнього проектування) рисунок 1 розробка виконується як частина системи більш високого рівня (рівні літака).

Виконується попередня робота по оцінці вимог до системи, де виробляються норми, і вимоги відповідно до яких буде розроблятися і сертифікуватися система, результатом якої є сертифікаційний базис. Визначається коло завдань, які повинна вирішувати система та визначаються умови функціонування системи. В процесі аналізу виконується визначення типу системи, виходячи з попередніх вимог до літака, і попередні характеристики системи, які можуть уточнюватися і коректуватися в процесі проектування літака. Результатом етапу є вироблення вимог до системи і складання технічних вимог.



Рис. 1. Етап зовнішнього проектування (макропроектування).

Після вироблення технічних вимог системи і видачі для проектування силами літакобудівної компанії або підрядником роботи переходять на етап попереднього проектування рисунок 2.

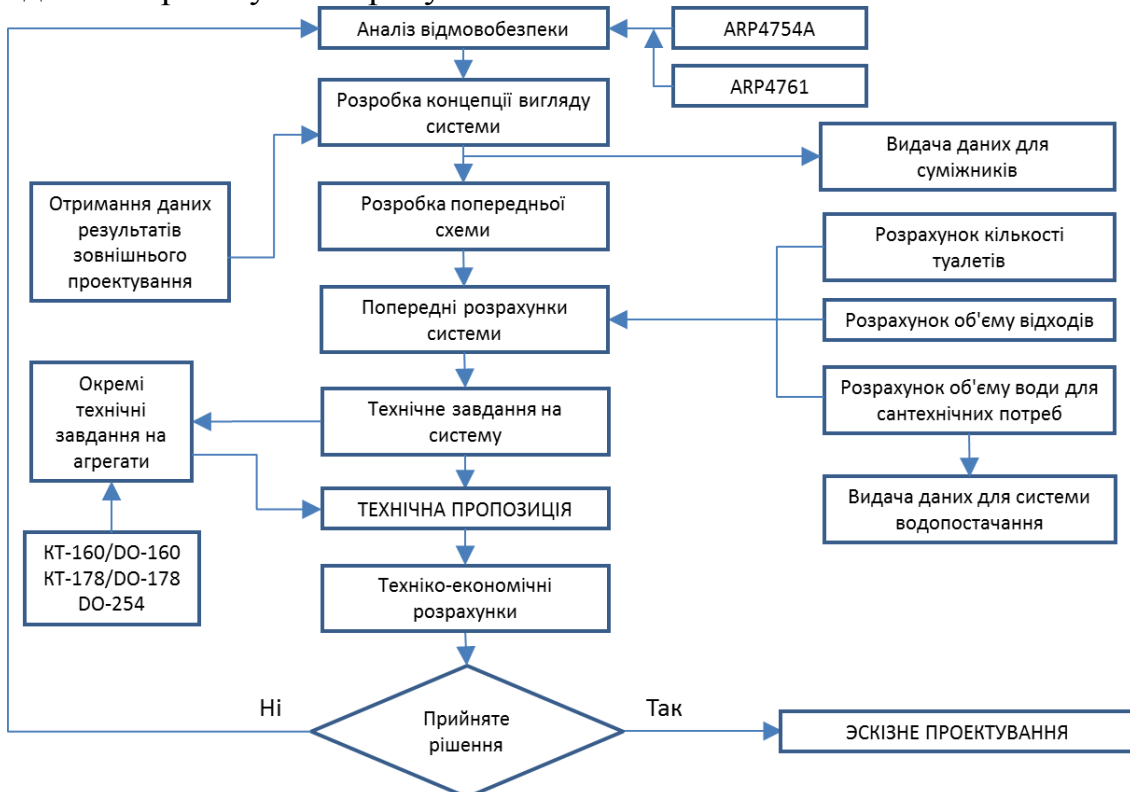


Рис. 2. Етап попереднього проектування.



Даний етап фактично є початком проектування, і робота з проектування починається з виконання аналізу відмовобезпеки. Даний аналіз виконується з урахуванням рекомендацій та вимог ARP4754A. У процесі виконання аналізу визначається концепція майбутньої системи виходячи з базових вимог до системи і літака та основних характеристик системи. Розробляється попередня принципова схема, і виконуються попередні розрахунки. Під час аналізу виконується декомпозиція системи, розчленування на окремі частини - елементи (підсистеми) з локалізацією функцій і цілей кожної з них; синтез структури (визначення стійких взаємозв'язків елементів системи); проектування окремих частин, налагодження частин і стикування елементів системи в цілому.

В результаті проведеного аналізу виробляється технічне завдання на розробку системи та окремих елементів або агрегатів.

Результатом робіт по виконанню технічного завдання, є технічна пропозиція(і), з обов'язковими техніко-економічними розрахунками.

Підсумком етапу попереднього проектування є перехід до етапу ескізного проектування.

Етап ескізного проектування (рисунок 3) починається з розробки принципової схеми заснованої на результатах технічної пропозиції, видачі вихідних даних для суміжних систем. Виконується попередній розрахунок трубопровідної мережі (гідрравлічний і газодинамічний розрахунок), попередній розрахунок баку зберігання відходів, розрахунок і вибір вакуумного генератора, і аналіз отриманих результатів розрахунків.



Рис. 3. Етап ескізного проектування.

Після ескізного проектування іде етап технічного проектування (рисунок 4) характерний виконанням робіт по компоновці систем і устаткування у складі літака (розміщення баку, трубопроводів, панелі обслуговування, тощо) і включає в себе зональний розподіл, видачу вимог для конструювання: технічних вимог для установки, технологічності, обслуговування.

На цьому етапі виконується дослідження зональної безпеки, визначення масово-габаритних характеристик для складання центрвальних характеристик літака, і виконання попередньої компоновки літака і прийняття рішення щодо переходу до етапу робочого проектування.



Рис. 4. Етап технічного проектування.

Розрахункова частина системи являється невід'ємною частиною процесу проектування і виконується і верифікується на різних етапах розробки системи але, тим не менш, є відокремленою роботою, алгоритм її виконання представлено на рисунку 5.

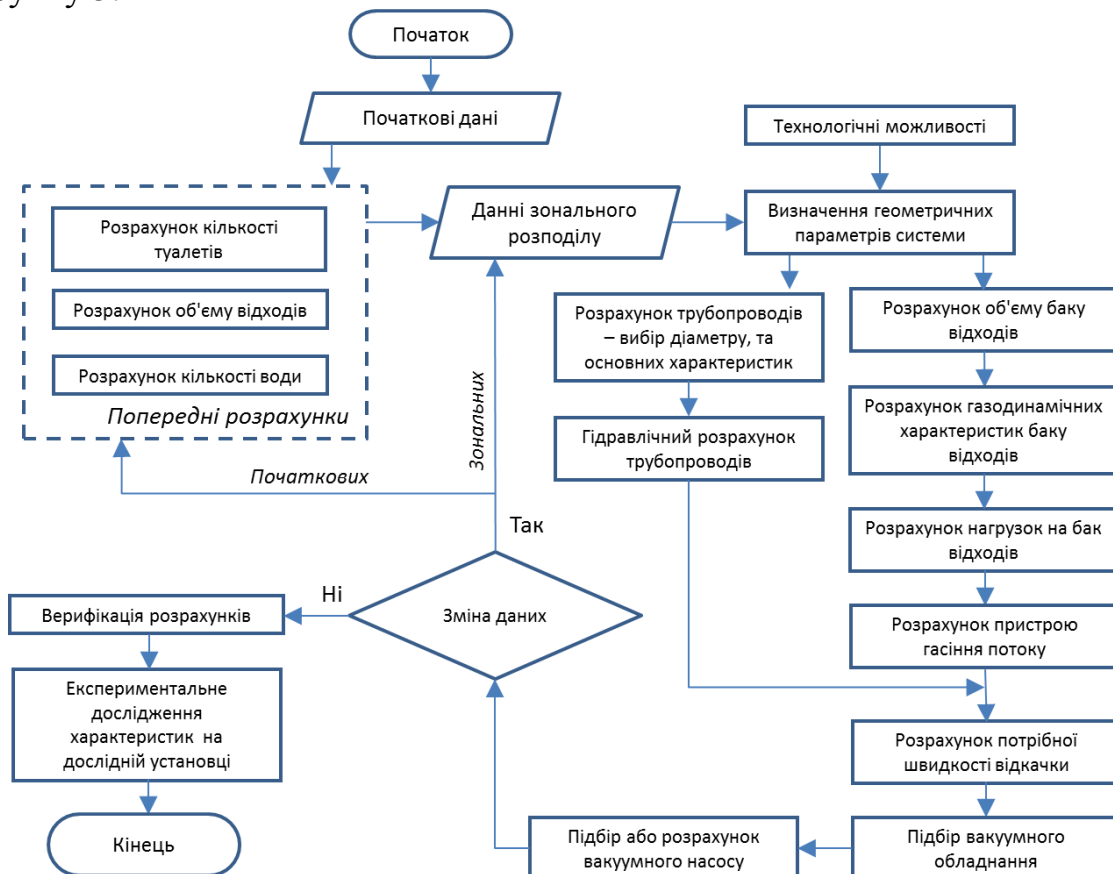


Рис. 5. Алгоритм розрахунку вакуумної системи видалення відходів літака.

Даний алгоритм розрахунку представляє систематизовану, покрокову процедуру розрахунків системи, і починається з вихідних даних літака і первинного попереднього етапу розрахунку системи, в якому визначаються розрахунок кількості туалетів, обсяг відходів та води для потреб системи. Надалі визначаються основні характеристики системи: підбір трубопроводів (газодинамічний розрахунок), вибір вакуумного насоса (генератора), комплексного розрахунку баку відходів.

На рисунку 6 представлено впроваджені комплекс програмних та технічних засобів розрахунку СВВ літака. Комплекс включає стандартні програмні засоби на основі яких розроблені модулі які використовуються для розрахунку системи.

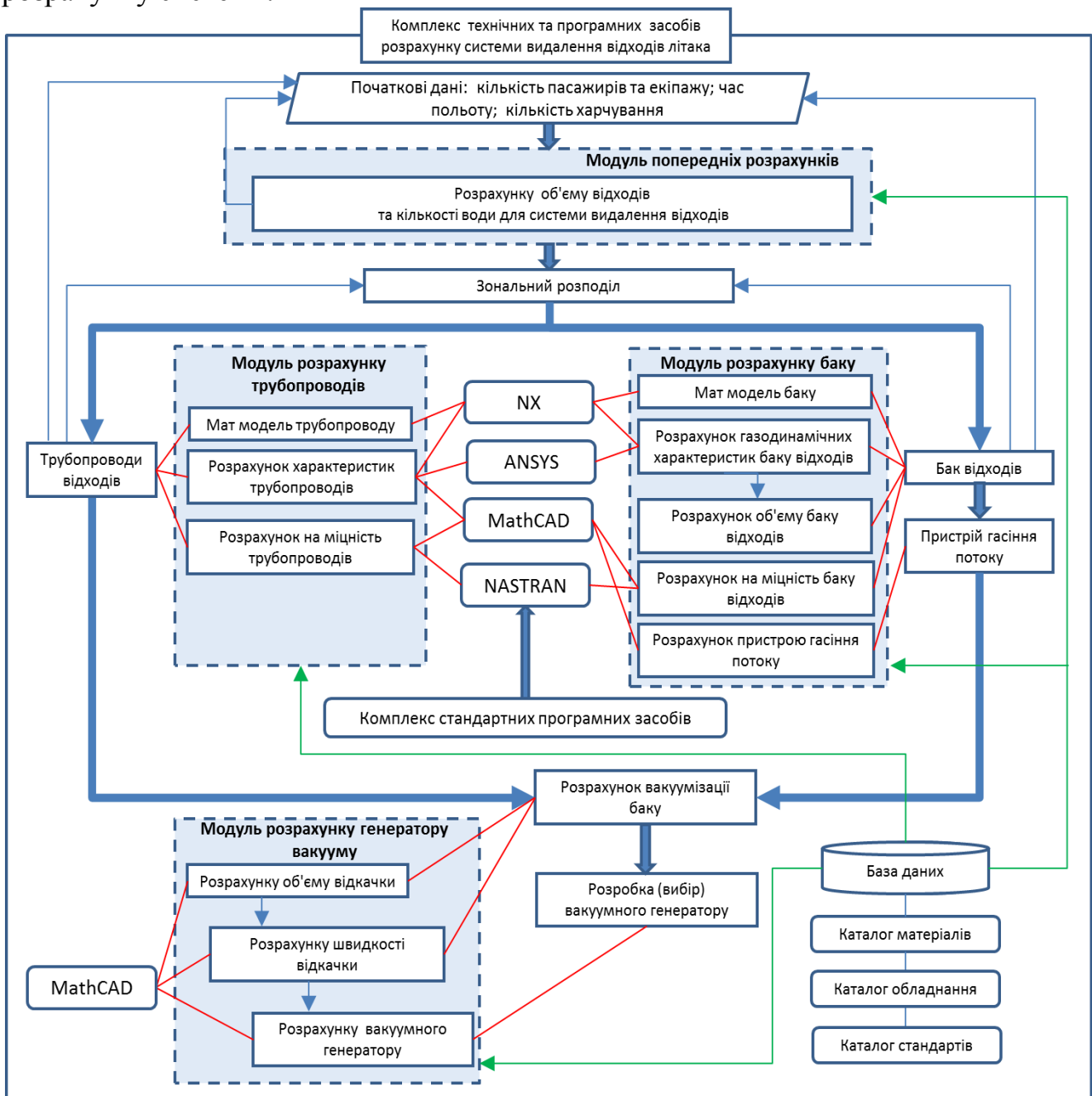


Рис. 6. Комплекс програмних та технічних засобів розрахунку СВВ літака.

У третьому розділі представлена математична модель течії двофазного середовища повітря – відходи у трубопроводі (в якості відходів застосовувався матеріал - вода).

Відходи, що переміщується трубопроводом представлені у вигляді матеріальної точки, яка рухається під дією різниці тиску по траєкторії визначеній формою трубопроводу.

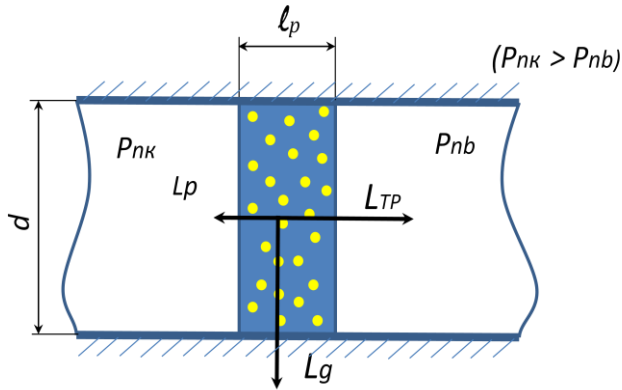


Рис. 7. Схема дії сил на об'єкт в трубопроводі видалення відходів

координату  $x(t)$ . Для матеріальної точки, напишемо рівняння другого закону Ньютона:

$$m \cdot a = F_{\text{зар}}$$

Силу, обумовлену різницею тиску можна визначити наступним чином:

$$F_{\text{тр}} = S \cdot (p_{nk} - p_{nb})$$

Так як об'єкт рухається в трубопроводі під дією аеродинамічних сил, для опису процесу використовуємо узагальнене рівняння енергії:

$$Q + \frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} = L + F_{mp} + g(z_2 - z_1) + U_2 - U_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \quad (1)$$

Виконавши аналіз членів що входять в дане рівняння приймемо такі припущення:

- процес енергетично ізолюваний, технічна робота і теплообмін з навколишнім середовищем відсутній;
- зміною потенційної енергії нехтуємо;
- внутрішня енергія одиниці маси газу не змінюється.

В результаті рівняння (1) набуде вигляду узагальненого рівняння Бернуллі для стисливої рідини з роботою сил тертя:

$$\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} = F_{\text{тр}} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \quad \text{звідки} \quad F_{\text{тр}} = \frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} - \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

Дію тиску повітря на торцеву поверхню відходу з боку салону літака та з боку баку можна записати:

$$p_{nk} = p_k^* - \frac{\rho_{nk} \cdot V^2}{2g} - \xi_{nk} \frac{\rho_{nk} \cdot V^2}{2g} \quad p_{nb} = p_b^* + \frac{\rho_{nb} \cdot V^2}{2g} + \xi_{nb} \frac{\rho_{nb} \cdot V^2}{2g}$$

Розрахувавши усі сили що діють на порцію відходів та коефіцієнти опорів після перетворень та розв'язання диференціальних рівнянь отримаємо:

В розробленій математичній моделі руху відходів прийняті наступні припущення: об'єкт приймається матеріальною точкою (відходи-вода нестисла рідина); стінки трубопроводу гідравлічно гладкі; режим течії в трубопроводі - турбулентний; процес є квазістаціонарним; газонатіканням і газовиділенням нехтуємо; повітря стисла рідина.

Параметри руху матеріальної точки визначено: швидкість  $V(t)$ ,

точка визначено: швидкість  $V(t)$ ,

Залежність швидкості руху об'єкту від часу визначимо:  $V = V_{max} \frac{e^{\frac{2V_{max} \cdot t}{m'}} - 1}{e^{\frac{2V_{max} \cdot t}{m'}} + 1}$

Визначимо переміщення:  $X = m' \cdot \ln \left( e^{\frac{2V_{max}}{m'} \cdot t} + 1 \right) - V_{max} t$

Час руху об'єкта:  $t = \frac{m'}{2V_{max}} \cdot \ln \left( \frac{2x}{e^{\frac{m'}{2V_{max}} \cdot t} - 2} \right)$

За допомогою представленої математичної моделі виконаний розрахунок у програмі MathCAD, результати якого представлені на рис. 8-11.

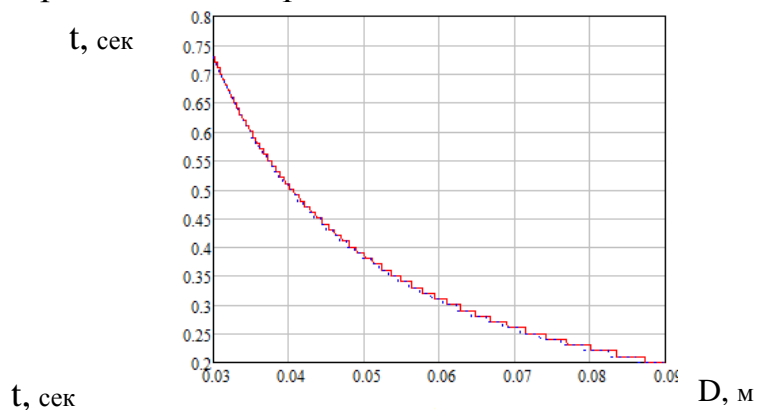
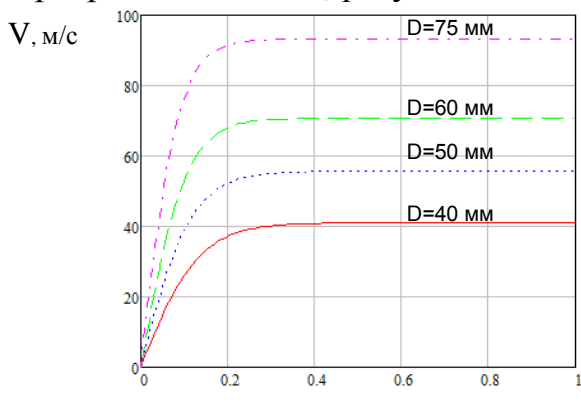


Рис. 8. Залежність швидкості порції відходів від часу (на початковій ділянці), діаметру трубопроводу при заданому перепаді (еквівалентному висоті 5000 м).

Рис. 9. Час переміщення порції відходів в залежності від діаметру трубопроводу для трубопроводу довжиною 20 м.

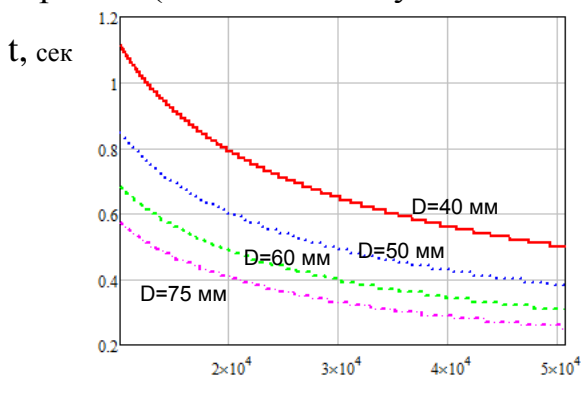


Рис. 10. Час для видалення відходів в залежності від перепаду тиску у трубопроводах різних діаметрів.

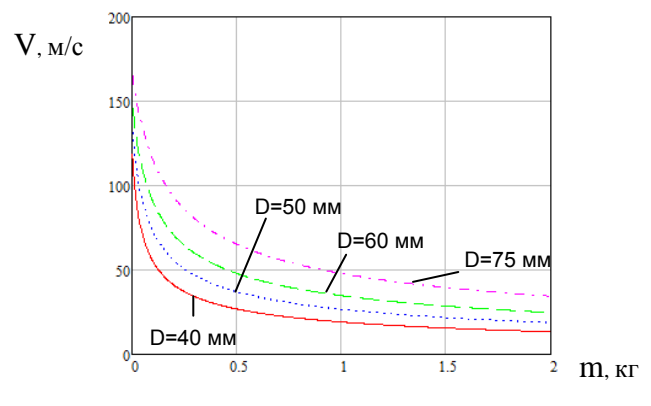


Рис. 11. Залежність швидкості видалення від ваги відходів при заданому перепаді у трубопроводах різних діаметрів.

У четвертому розділі представлені результати комплексної розробки баку зберігання відходів і дослідження процесу наповнюваності баку, методами чисельного моделювання з використанням програмного забезпечення Ansys CFX.

Наповнюваність баку впливає на загальну характеристику баку і суттєво впливає на масово-габаритні характеристики і як наслідок на розміщення обладнання яке встановлюється в бак.

Дослідження процесу створення розрідження дозволило встановити, що відрив частинок води (відходів) відбувається через високі швидкостей повітря в зазорі між вільною поверхнею і корпусом баку під дією розрідження. При

зменшенні площі поперечного перерізу даного зазору, пов'язаного зі збільшенням рівня відходів в баку, процес відриву відбувається з більшою інтенсивністю.

Отримані данні чисельного моделювання для баків різних діаметрів дозволили вивести залежність допустимої мінімальної висоти повітряного зазору між поверхнею відходів до верхньої стінки бака від діаметра бака, яка представлена на рисунку 12.

Дослідження в рамках роботи виконано для бак зберігання відходів літака Ан-148-100.

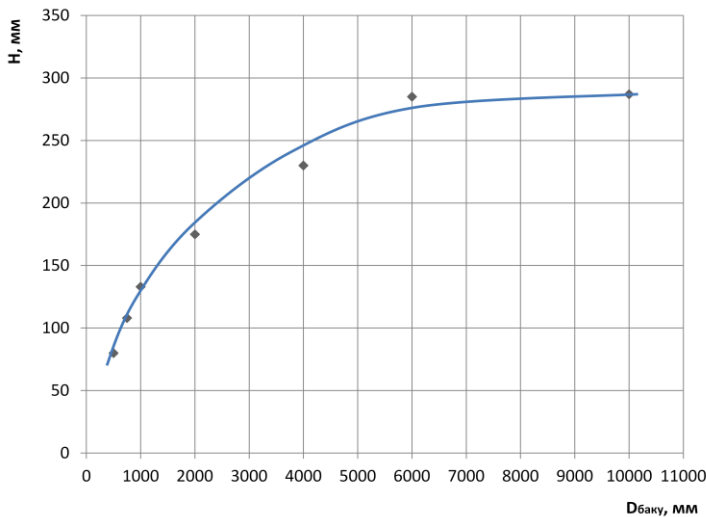


Рис. 12. Залежність необхідної мінімальної висоти повітряного зазору, яка забезпечує відсутності води у вихідному патрубку, від діаметра бака відходів.

Моделювання течії проводилося в нестационарній постановці. Час моделювання процесу наповнюваності бака складає 1 сек., і включає наступні етапи роботи агрегатів системи: початок роботи генератора вакууму, відкриття заслінки приймача відходів, попадання порції води в бак, закриття заслінки.

На рисунках 13 - 16 представлена візуалізація процесу створення розрідження в баку при висоті рівня відходів  $y_h = 400$  мм.

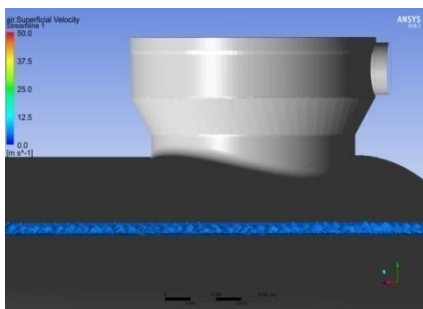


Рис. 13. Початковий момент вакуумізації.

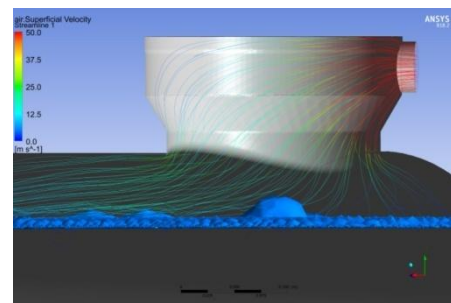


Рис. 14. Після включення вакуумного генератора.

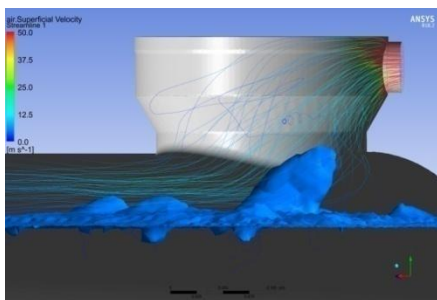


Рис. 15. Початок формування відриву.

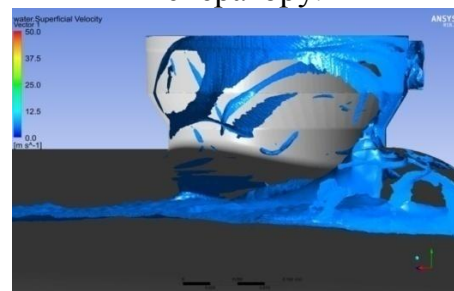


Рис. 16. Момент після відключення вакуумного генератора.

Результати чисельного моделювання процесу наповнюваності бака дозволили визначити залежність коефіцієнта об'ємного вмісту води в вихідному трубопроводі від різних значень початкового рівня води в баку. На підставі отриманих даних а, також порівняння даних експерименту отримано рівень відходів у баку при якому відходи не потрапляють до системи вакуумізації (що є однією з вимог при проектуванні данної системи).

**П'ятий розділ** присвячений аналізу та обробці результатів експериментальних досліджень, спрямованих на апробацію і визначення ступеня достовірності запропонованих моделей. Наведено матеріали випробувань баку відходів і повноцінно встановленої на випробувальному літаку системи видалення відходів.

Для проведення натурних випробувань баку був розроблений функціональний стенд, для якого був спроектований спеціальний бак відходів.

Принципова схема стенда представлена на рисунку 17.

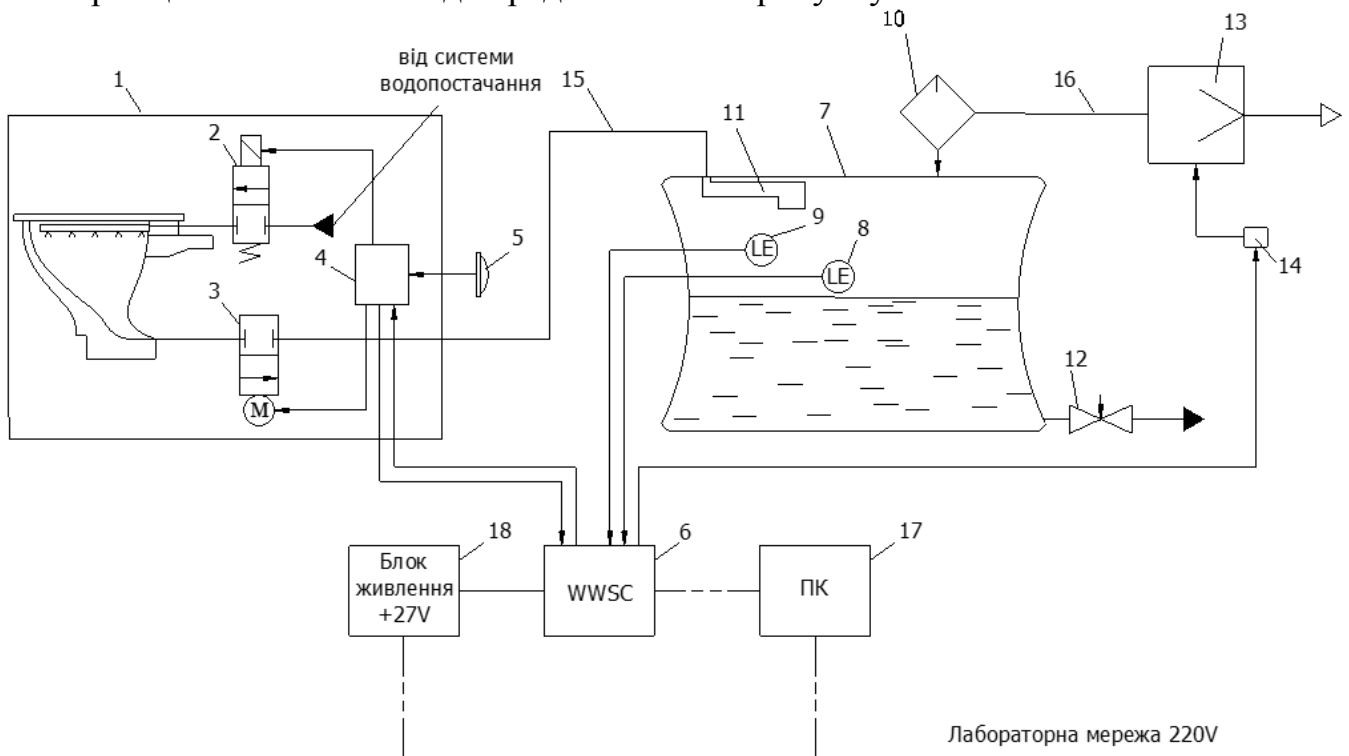


Рис. 17. Принципова схема випробувального стенду.

До складу стенду входять наступні агрегати: 1 - приймач відходів (блок унітазу), 2 - Розділювальний клапан, 3 - Заслінка, 4 - Блок управління клапанами; 5 Кнопка змиву; 6 - Контролер управління системою; 7 - Бак зберігання відходів; 8 - Датчик рівня  $\frac{3}{4}$  баку; 9 - Датчик рівня 100% баку; 10 - Сепаратор; 11 - Розсікач відходів; 12 - Клапан зливу відходів; 13 - Генератор вакууму; 14 - Пусковий реле генератора вакууму; 15 - трубопровід видалення відходів; 16 - трубопровід вакуумізації (плексиглас); 17 - Персональний комп'ютер; 18 - Блок живлення.

Експериментальний бак 7 виготовлений на базі штатного баку, і має відмінності в частині наявності вбудованих оглядових вікон, для забезпечення контролю і візуального спостереження за процесом випробування. Трубопровід 16 системи вакуумізації, що з'єднує бак з генератором вакууму, виконаний з прозорого плексигласу для візуального спостереження.



Для проведення випробувань був розроблений план експерименту, що дозволяє всебічно оцінити можливості баку і його характеристики в частині наповнюваності; оцінки коректності розміщення датчиків; ефективності: розсікача відходів, розміщення форсунок промивання баку, повного видалення (зливу) відходів з баку при його очищенні.

Випробування проводилися в два етапи: на першому етапі випробування процесів наповнюваності проводилися за допомогою робочого середовища - вода. На другому етапі випробування проводилися за допомогою робочого середовища - імітатора відходів.

На етапі випробувань у складі дослідного літака виконана повна і всебічна перевірка баку і системи в комплексі на працездатність і підтвердження заявленим характеристикам.

Згідно із запропонованою методикою було виконана комплексне відпрацювання системи видалення відходів на різних режимах роботи де були підтверджені заявлені характеристики та прийняті конструктивні рішення.

У додатку наведено документи про впровадження результатів дисертаційної роботи.

## **ВИСНОВКИ**

В результаті наукових досліджень вирішено науково-практичне завдання розробки методик проектування та розрахунку СВВ видалення відходів для пасажирських літаків, які відображають поетапний алгоритм розробки СВВ на етапах науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт.

1. Запропонована і апробована методика проектування СВВ вакуумного типу для пасажирських літаків для систематизації та ієрархічного представлення процесу проектування, яка враховує особливості процесу розробки на етапах проектування системи, та забезпечує прийняття концептуальних рішень для реалізації проекту та виготовлення СВВ.

2. Запропоновано методику та комплекс програмних і технічних засобів розрахунку СВВ вакуумного типу для пасажирських літаків, що забезпечує отримання повних і якісних характеристик системи.

3. Розроблена математична модель квазістаціонарних газодинамічних процесів двофазної течії, що протікають при видалення відходів в трубопроводах системи, за допомогою якої визначені конструктивні характеристики трубопроводів СВВ на літаку Ан-148.

4. Розроблена математична модель нестационарних газодинамічних процесів, що протікають у баку зберігання відходів, яка реалізована за допомогою програмного забезпечення Ansys CFX, та за допомогою якої досліджено процеси наповнюваності та вакуумізації баку і визначено залежність коефіцієнта об'ємного вмісту води в вихідному трубопроводі від різних значень початкового рівня води в баку.

5. Виконана апробація математичної моделі баку відходів літака Ан-148, для чого розроблено конструкцію випробувального стенду для проведення фізичного експерименту баку СВВ. Проведено натурні випробування окремих агрегатів і системи видалення відходів в цілому і отримані результати, які



підтвердили відповідність отриманих розрахункових характеристик і свою працездатність в складі об'єкта. При порівнянні результатів фізичного експерименту і чисельного дослідження встановлено, що вони співпадають з достатньою точністю.

6. Виконано аналіз існуючих систем видалення відходів зокрема вакуумного типу та визначено критерії та вимоги до розробки системи, виконаний аналіз літературних джерел по темі створення та розробки систем видалення відходів.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Медведєв С.В. Аспекти розвитку систем видалення відходів та водопостачання. Короткий огляд систем / С.В. Медведєв // Промислова гідравліка і пневматика. – 2008. – №1(19). – С. 58–62.

2. Шмырев В.Ф. Энергетическая и весовая оптимизация самолетных водовакуумных систем / В.Ф. Шмырев, С.В. Медведєв // Промислова гідравліка і пневматика. – 2008. – №1(19). – С. 51–54.

3. Борисов Б.Е. Исследование полей температур в зонах размещения агрегатов водовакуумных систем и методы обеспечения их потребных значений / Б.Е. Борисов С.В. Медведєв, В.Ф. Шмырев // Промислова гідравліка і пневматика. – 2006. – №2(12). – С. 22–24.

4. Medvediev S. V. Airplane waste disposal system tank designing using numerical modeling and experimental bench results / S. V. Medvediev D.H. Lantin // Journal of Engineering Sciences, Volume 6, Issue 2 (2019), – pp. E 41–E 46.

5. Медведєв С.В. Моделювання газодинамічних процесів у трубопроводах при видаленні відходів / С.В. Медведєв, В.М. Бадах // Mechanics and Advanced Technologies. – Vol. 87, №3. К., 2019. – С. 83–90.

6. Медведєв С.В. Методика проектування системи видалення відходів як частина комплексного розроблення конструкції літака / С.В. Медведєв // Промислова гідравліка і пневматика. – 2019. – №2 ( 64 ). – С. 3–10.

7. Medvediev S. V. Research of airplane waste disposal system tank characteristics by method of numerical simulation. / S. V. Medvediev // Global Journal of Research in Engineering, Vol. 20, №1-I, 2020. – pp. 25–30.

#### Тези доповідей

8. Медведєв С.В. Обоснование применения вакуумных систем удаления отходов на борту пассажирского самолета/ С.В. Медведєв // Матеріали XIII Міжнар. наук.-тех. конф. АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» 2013 р. : тези доп. – Одеса, 2013. – С.104. – 144 с.

9. Медведєв С.В. Моделювання процесу видалення відходів в трубопроводі вакуумної системи літака / С.В. Медведєв // Матеріали VIII Міжнар. наук.-практич. конф. «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» 2018 р. : тези доп. – Чернігів, 2018. – С.231. – 242 с.

10. Медведєв С.В. До питання методології проектування вакуумної системи літака / С.В. Медведєв // Матеріали XIX Міжнар. наук.-тех. конф. АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» 2018 р. : тези доп. – Львів, 2018. С.89. – 104 с.

11. Медведєв С.В. Методологічні засади розрахунку і проектування системи видалення відходів літака / С.В. Медведєв // Матеріали III Міжнар. наук.-тех. конф. «Гідро - та пневмоприводи машин - сучасні досягнення та застосування» 2018 р.: тези доп. – Вінниця, 2018. – С. 44–45. – 176 с.

12. Медведєв С.В. Розробка систем видалення відходів літака на етапі попереднього проектування з використанням системного методу / С.В. Медведєв // Матеріали XXVII Міжнародна науково-практична конференція MicroCAD-2019 «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» 2019 р. : тези доп. – Харків, 2019. Частина 1, – С.203. – 368 с.

13. Медведєв С.В. Критерії формування вигляду системи видалення відходів літака / С.В. Медведєв // Матеріали IX Міжнар. наук.-практич. конф. «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» 2019 р.: тези доп. – Чернігів, 2019. Том 1, – С.233-234. – 240 с.

14. Медведєв С.В. Комплекс технічних та програмних засобів розрахунку системи видалення відходів літака як частина комп'ютерно-інтегрованої технології проектування / С.В. Медведєв // Матеріали XX Міжнар. наук.-тех. конф. АС ППП «Промислова гідравліка і пневматика» 2019 р.: тези доп. – Київ, 2019. – С.123-124. – 184 с.

15. Медведєв С.В. Методика розрахунку системи видалення відходів як частини технології проектування сучасного пасажирського літака / С.В. Медведєв // Матеріали IV Міжнар. наук.-тех. конф. «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування» 2020 р.: тези доп. – Вінниця, 2020. [Електронний ресурс]. URL:<http://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Fctam.vntu.edu.ua%2Fimages%2Fdoc%2F2020%2Fmedvedev.pdf>.

16. Медведєв С.В. Розробка розрахункового комплексу системи видалення відходів // С.В. Медведєв // Матеріали X Міжнар. наук.-практич. конф. «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» 2020 р.: тези доп. – Чернігів, 2020. Т 1, – С. 216-218. – 272 с.

17. Medvediev S., Approaches to the design of modern technology // S. Medvediev, V. Badakh // International scientific conference "forest engineering: new techniques, technology and environment". – Lviv, 2020. – P 41. – 64 p.

## АНОТАЦІЯ

Медведєв С. В. Проектування вакуумних систем видалення відходів пасажирських літаків - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.02 «Проектування, виробництво та випробування літальних апаратів» - Національний авіаційний університет, Державне підприємство «АНТОНОВ», Київ, 2021.

**Зміст анотації.** Дисертація присвячена проектуванню СВВ вакуумного типу сучасного літака, яка описує поетапний процес і методи розробки системи, розробку математичних моделей, розрахункового комплексу.

Запропонована методика проектування системи видалення відходів, яка дозволяє виконати поетапну розробку системи від створення концепції, її вихідних даних, до реалізації на літаку.

Запропонована методика розрахунку та розрахунковий комплекс який охоплює усі потрібні для проектування розрахунки та рекомендує етапність виконання розрахунків в залежності від стадії проекту.

Розроблено математичну модель, що описує квазістаціонарні гідравлічні процеси течії відходів в трубопроводі системи видалення відходів літака, за допомогою якої визначаються геометричні та газодинамічні характеристики трубопроводу.

Використовуючи програмне забезпечення Ansys CFX проведено дослідження процесів вакуумізації та наповнюваності баку зберігання відходів, що є складовою розрахунку баку відходів.

За результатами чисельних досліджень визначено мінімально допустиме значення товщини повітряного зазору між поверхнею відходів та баком для різних діаметрів баків, при якому концентрація відходів у магістралі вакуумування не перевищить критичних значень.

Результати роботи успішно впроваджені у виробничу практику на ДП «Антонов», що підтверджується актом впровадження.

**Ключові слова:** вакуум, літак, система видалення відходів, вакуумна система, проектування, бак відходів, методика, розрахунковий комплекс, чисельний метод.

## АННОТАЦІЯ

Медведев С. В. Проектирование вакуумных систем удаления отходов пассажирских самолетов - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.02 «Проектирование, производство и испытания летательных аппаратов» - Национальный авиационный университет, Государственное предприятие «Антонов», Киев, 2021.

Содержание аннотации. Диссертация посвящена проектированию системы удаления отходов вакуумного типа современного самолета, которая описывает поэтапный процесс и методы разработки системы на этапах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, разработку математических моделей, расчетного комплекса и позволяет на ранних этапах проектирования системы получить качественные характеристики будущей системы.

Тенденции проектирования и эксплуатации современных самолетов привели к созданию на борту новых усовершенствованных систем. Не исключением стала и одна из систем жизнеобеспечения - система удаления отходов, которая обеспечивает необходимые комфортные условия на борту самолета и предназначена для удовлетворения физиологических потребностей организма человека.

Современные требования к комфорту, санитарно-гигиеническим нормам, экологичности, энергосбережения, технологичности, требования к минимизации затрат на обслуживание, повышение эксплуатабельности и т. д., заставляют

проектировщика систем, прикладывать немало усилий и ресурсов для создания конкурентоспособного продукта.

Проведенный анализ существующих методов, концепций, и подходов к проектированию систем самолетов, расчетов составных частей системы удаления отходов (СУО) показал, что отсутствует комплексный, научно обоснованный подход к методике проектирования СУО, ее расчета и определения рациональных характеристик системы.

Такие подходы к проектированию системы является служебной или конфиденциальной информации и уникальны для каждой самолетостроительной фирмы или вообще отсутствуют, и на практике конструктор сталкивается с их разрозненностью, половинчатостью, и часто незавершенностью.

Современное проектирование любой системы на борту самолета является сложным, многофакторным, разветвленной задачей и заключается в нахождении оптимального соотношения параметров, при котором основными приоритетами являются безопасность и комфорт пассажиров на борту.

В связи с этим предложена методика проектирования СУО, которая позволяет выполнить поэтапную разработку системы от создания концепции, ее исходных данных, к реализации на самолете, как отдельной функциональной системы, интегрированной и проектируемой в комплексе всего самолета.

Предложена методика расчета и расчетный комплекс, который охватывает все необходимые для проектирования расчеты и рекомендует этапность выполнения расчетов в зависимости от стадии проекта.

Разработана математическая модель, описывающая квазистационарные гидравлические процессы течения отходов в трубопроводе СУО самолета, с помощью, которой определяются геометрические и газодинамические характеристики трубопровода, что позволяет более качественно выполнить моделирование рабочих режимов и сократить время оптимизации системы и выбора трубопроводов по заданным параметрам.

Используя программное обеспечение Ansys CFX, проведено исследование процессов вакуумирования и наполняемости баке хранения отходов, которое показало, что попадание отходов в магистраль вакуумирования происходит из-за значительной интенсификации процесса отрыва частиц отходов при уменьшении толщины воздушного зазора вследствие больших скоростей воздушных потоков, возникающих в процессе вакуумирования.

По результатам многочисленных исследований определено минимально допустимое значение толщины воздушного зазора между поверхностью отходов и баком для различных диаметров баков, при котором концентрация отходов в магистрали вакуумирования не превысит критических значений.

Практическая ценность полученных результатов заключается в предложенных методиках проектирования и расчета системы удаления отходов вакуумного типа для пассажирских самолетов. Методика расчета позволяет за счет комплекса программных и технических средств выполнить весь необходимый объем расчетов для получения характеристик системы; методика проектирования систематизировать процесс проектирования, выполнить оценку объема работ по проекту, выполнить конфигурирование системы и ее элементов.

Разработанная математическая модель трубопровода позволяет получить нужные характеристики трубопровода в зависимости от предварительных условий. Предложенная математическая модель процесса наполняемости баке - получить характеристики бака, который соответствует установленным требованиям.

Результаты работы успешно внедрены в производственную практику на ГП «Антонов» и апробированы при разработке системы удаления отходов для самолетов семейства Ан-148-100 и его модификаций (серийно эксплуатируемых), используются при разработке новых систем, что подтверждается актом внедрения.

Ключевые слова: вакуум, самолет, система удаления отходов, вакуумная система, проектирование, бак отходов, методика, расчетный комплекс, численный метод.

### ABSTRACT

Medvediev Serhii. Passenger aircraft vacuum waste system design. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for the degree of the candidate of technical sciences in specialty 05.07.02 "Designing, Production and Testing of Aircraft" (013 - Mechanical Engineering) - National Aviation University, ANTONOV Company, Kyiv, 2021.

**Contents of the abstract.** The dissertation is devoted to the design of the vacuum waste disposal system of a modern aircraft, which describes the step - by - step process and methods of system development, development of mathematical models, calculation complex.

A method of designing a waste disposal system is proposed, which allows to perform a step-by-step development of the system from the creation of the concept, its initial data, to implementation on the aircraft.

The method of calculation and the calculation complex which covers all calculations necessary for designing and recommends step-by-step execution of calculations depending on a stage of the project are offered.

A mathematical model has been developed that describes quasi-stationary hydraulic processes of waste flow in the pipeline of the aircraft waste disposal system, which determines the geometric and gas-dynamic characteristics of the pipeline.

Using Ansys CFX software, a study of the processes of vacuuming and filling the waste storage tank, which is part of the calculation of the waste tank.

Based on the results of numerical studies, the minimum allowable value of the air gap thickness between the waste surface and the tank for different tank diameters, at which the concentration of waste in the vacuum line will not exceed the critical values.

The results of the work have been successfully implemented in the production practice at the State Enterprise "Antonov", which is confirmed by the act of implementation.

**Keywords:** vacuum, aircraft, waste disposal system, vacuum system, design, waste tank, methodology, calculation complex, numerical method.